



FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

2015/2016

Modelação Hidrodinâmica de uma Região Contaminada com Metais Pesados

Hugo João Ribeiro Vasconcelos

Dissertação submetida para obtenção de grau de

MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri: Manuel Fernando Ribeiro Pereira
Professora Associado do Departamento de Química da Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto

Orientadora académica: Maria Cristina da Costa Vila

Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia de Minas

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Co-orientador académico: António Manuel Antunes Fiúza

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia de Minas

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Março de 2016

© Hugo Vasconcelos, 2016 (hugojrv90@gmail.com)

Reservados todos os direitos de publicação, tradução e adaptação.

Interdita a reprodução parcial ou integral sem prévia autorização do autor.

Departamento de Engenharia de Minas

Mestrado em Engenharia do Ambiente

Modelação Hidrodinâmica de uma Região Contaminada com Metais Pesados

Hugo João Ribeiro Vasconcelos

Fevereiro de 2016

Orientadora:

Maria Cristina da Costa Vila

Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia de Minas

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Co-orientador:

António Manuel Antunes Fiúza

Professor Catedrático do Departamento de Engenharia de Minas

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

RESUMO

A drenagem mineira associada aos resíduos e cinzas de carvão constitui uma preocupação ambiental ao longo da bacia carbonífera do Douro.

A deposição contínua durante cerca de 40 anos de resíduos e cinzas de carvão gerou um aterro com um volume superior a 1 milhão de metros cúbicos, que embora aparentemente estabilizado, (superfície coberta com vegetação) permite a infiltração e percolação da água superficial resultando na contaminação da água subterrânea.

O objetivo deste trabalho foi a criação de um modelo conceptual para o aterro de forma a estudar os mecanismos de dispersão dos contaminantes na água subterrânea na zona do aterro. Para tal foram criados dois cenários distintos correspondentes a dois períodos temporais separados entre si pela construção de uma autoestrada.

O GMS-MODFLOW foi a ferramenta escolhida para o estudo do transporte e destino dos contaminantes na área em estudo.

O modelo conceptual construído com o GMS-MODFLOW permitiu obter mapas de distribuição espacial dos contaminantes na água subterrânea de 2007 até 2014.

Constatou-se que a zona que apresenta maiores preocupações ambientais é a zona onde está localizado o Pz3, situado no centro do aterro de cinzas.

Palavras-chave: GMS-MODFLOW, água subterrânea, interpolação, hidrogeologia, aterro de cinzas

ABSTRACT

The mine drainage associated with waste and coal ash is an environmental concern along the coal basin of the Douro.

The continuous landfilling for around 40 years of waste and coal ashes generate a landfill with a volume exceeding 1 million cubic meters, which although seemingly stabilized (surface covered with vegetation) allows infiltration and percolation of surface water resulting in the contamination of the groundwater.

The objective of this work was the creation of a conceptual model for the landfill in order to study the mechanisms of dispersion in the groundwater in the landfill area. To this it was created two distinct scenarios corresponding to two time periods separated by the construction of a highway.

The GMS-MODFLOW was the chosen tool for the study of transportation and destiny of the contaminants in the study area.

The conceptual model built with the GMS-MODFLOW allowed us to obtain special distribution maps of the contaminants in the groundwater from 2007 to 2014.

It was found that the area that presents the greatest environmental concerns is the zone where the PZ3 is located, in the center of the ashes landfill.

Keywords: GMS-MODFLOW, groundwater, interpolation, hydrology, ashes landfill

AGRADECIMENTOS

Aproveito a oportunidade para agradecer aos meus pais pela força e dedicação que me proporcionaram ao longo de todo este percurso académico, pelos conselhos e contributos que me serviram de inspiração para a conclusão desta etapa.

À Professora Doutora Maria Cristina da Costa Vila, orientadora desta dissertação, pelos conselhos valiosos e assertados, pela amizade e disponibilidade demonstrada.

Ao Professor Doutor António Manuel Antunes Fiúza, co-orientador desta dissertação, por me ter concebido um projeto de grande interesse e relevância, pela disponibilidade e amizade demonstrada ao longo do trabalho de dissertação.

À Professora Doutora Renata Maria Gomes dos Santos pelos ensinamentos e por toda a contribuição científica transmitidos ao longo do trabalho desenvolvido ao longo destes cinco meses.

Para finalizar a todos os meus colegas que sempre me ajudaram a ultrapassar os obstáculos que foram aparecendo ao longo deste percurso.

ÍNDICE

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xv
Abreviaturas	xvii
Capítulo 1. Introdução.....	19
1.1 Considerações Gerais	19
1.2 Objetivos e Importância do Tema.....	21
1.3 Estrutura da Dissertação	22
Capítulo 2. Enquadramento e Âmbito	23
2.1 Bacia Carbonífera do Douro.....	23
2.2 Descrição e Funcionamento das Centrais Termoelétricas	24
2.3 Cinzas de Carvão	25
2.3.1 Efeitos ambientais das cinzas de carvão.....	26
2.3.2 Metais pesados e seus efeitos na água subterrânea.....	27
2.4 Sulfatos e seus Efeitos na Água Subterrânea	28
2.5 Propriedades da Água	29
Capítulo 3. Caracterização do Caso de Estudo.....	31
3.1 Enquadramento Geográfico da Área de Estudo	31
3.2 Geologia e Geomorfologia da Região	32
3.3 Hidrodinâmica	33
Capítulo 4. Modelação Hidrogeológica	35
4.1 Descrição e Funcionalidades do GMS-MODFLOW	35
4.2 Metodologia Adotada na Construção do Modelo Conceptual	40
4.2.1 Passos da Metodologia Adotada	41
4.2.2 Análise e seleção da informação recolhida.....	45

4.2.3	Modelação do Sistema Hidrodinâmico.....	48
Capítulo 5. Resultados e Discussão		51
5.1	Tratamento dos Dados	51
5.2	Levantamento Topográfico	52
5.2.1	Construção e triangulação (TIN: <i>Triangulated Irregular Network</i>)	52
5.2.2	Mapa das elevações do aterro de cinzas.....	53
5.3	Parâmetros Físicos de Caraterização da Água Subterrânea	54
5.3.1	Condutividade elétrica	54
5.3.2	pH	56
5.4	Metais Pesados Detetados na Água Subterrânea	58
5.4.1	Alumínio	58
5.4.2	Arsénio.....	59
5.4.3	Chumbo.....	61
5.4.4	Cobre	62
5.4.5	Ferro	63
5.4.6	Manganês.....	64
5.4.7	Níquel.....	65
5.4.8	Zinco	67
5.5	Sulfatos	68
5.6	Análise da Variação do Nível Piezométrico	69
Capítulo 6. Considerações Finais.....		71
6.1	Conclusões	71
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	73
Bibliografia.....		74
Anexo I.....		79
Anexo II		83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Percentagem de água subterrânea utilizada para irrigação, adaptado de (Siebert, et al., 2010).	20
Figura 2: Excerto da Carta Geológica de Portugal evidenciando as principais explorações de carvão na Bacia Carbonífero do Douro, adaptado de (GeoPortal, 2014).	23
Figura 3: Esquema funcional de uma central termoelétrica a carvão, adaptado de (USGS, 2014).	25
Figura 4: Imagem representativa de terreno para o armazenamento de carvão (Barbosa, 2008).	27
Figura 5: Excerto da carta geológica do local do aterro de cinzas, adaptado de (Empresa, 2016).	33
Figura 6: Exemplo da hierarquia de fluxos nos sistemas de águas subterrâneas de acordo com Toth (Tóth, 1971).	36
Figura 7: Exemplo de uma grelha tridimensional para simular o movimento tridimensional de uma água subterrânea, adaptado de (U.S. Department of the Interior, 1997).	38
Figura 8: Modelo processual da abordagem a um modelo conceptual, adaptado de (Zhou & Li, 2011).	39
Figura 9: Excerto da carta militar, 1:25000 (folha 134, edições de 1998 e de 2012) do local do aterro de cinzas (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).	41
Figura 10: Modelo representativo com os cursos de água e pontos de amostragem (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).	42
Figura 11: Pontos de dispersão 2D (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).	43
Figura 12: Sobreposição das cartas militares com a “grid frame” (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).	44
Figura 13: Sobreposição das cartas militares com a grelha primária (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).	44

Figura 14: Sobreposição das cartas militares mais grelha refinada, apenas células ativas (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).	45
Figura 15: TIN representativa do modelo da superfície da área em estudo. Escala numérica em metros (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).	52
Figura 16: Mapa das elevações da área em estudo. Escala numérica em metros (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).	53
Figura 17: Mapa da distribuição dos valores da EC, em $\mu\text{S}/\text{cm}$; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.	54
Figura 18: Mapa da distribuição dos valores da EC, em $\mu\text{S}/\text{cm}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014	55
Figura 19: Mapa da distribuição dos valores do pH; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.	56
Figura 20: Mapa da distribuição dos valores do pH; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.	57
Figura 21: Mapa da distribuição dos níveis de Alumínio; em $\mu\text{g}/\text{L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014	58
Figura 22: Mapa da distribuição dos níveis de Arsénio; em $\mu\text{g}/\text{L}$; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.	59
Figura 23: Mapa da distribuição dos níveis de Arsénio; em $\mu\text{g}/\text{L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.	60
Figura 24: Mapa da distribuição dos níveis de Chumbo; em $\mu\text{g}/\text{L}$; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.	61
Figura 25: Mapa da distribuição dos níveis de Cobre; em $\mu\text{g}/\text{L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.	62
Figura 26: Mapa da distribuição dos níveis de Ferro; em $\mu\text{g}/\text{L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.	63
Figura 27: Mapa da distribuição dos níveis de Manganês; em $\mu\text{g}/\text{L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.	64
Figura 28: Mapa da distribuição dos níveis de Níquel; em $\mu\text{g}/\text{L}$; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.	65

Figura 29: Mapa da distribuição dos níveis do Níquel; em $\mu\text{g/L}$ A)Janeiro/2012; B)Agosto/2012; C)Fevereiro/2013; D)Agosto/2013; E)Março/2014.	66
Figura 30: Mapa da distribuição dos níveis de Zinco; em $\mu\text{g/L}$; A)Janeiro/2012; B)Agosto/2012; C)Fevereiro/2013; D)27/07/2013; E)Março/2014.	67
Figura 31: Mapa da distribuição dos níveis de Sulfato; em $\mu\text{g/L}$; A)Janeiro/2012; B)Agosto/2012; C)Fevereiro/2013; D)Agosto/2013; E)Março/2014.	68
Figura 32: Variação do nível piezométrico; em metros; A) Agosto/2007; B)Agosto/2008; C)Agosto/2009; D)Agosto/2010.	69
Figura 33: Variação do nível piezométrico; em metros; A)Janeiro/2012; B)Agosto/2012; C)Fevereiro/2013; D)Agosto/2013; E)Março/2014.....	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Lista das Propriedade da Água, adaptado de (Swanson & Baldwin, 1965; Bates, 1973; Bruckner, 2014; Lim, 2006; EPA, 2012; Miller, et al., 1988).....	29
Tabela 2: Volumes de cinzas adicionadas e removidas do aterro (Empresa, 2016)....	32
Tabela 3: Coordenadas digitais dos pontos de amostragem, adaptado de (GMS-MODFLOW, 2015)	43
Tabela 4: Compilação das concentrações dos metais pesados, níveis piezométricos, pH e condutividade elétrica. Cenário A, adaptado de (Empresa, 2016).	47
Tabela 5: Compilação dos valores da concentração, níveis piezométricos, valores de pH e condutividade elétrica. Cenário B, adaptado de (Empresa, 2016).	48

ABREVIATURAS

Al - Alumínio

As - Arsénio

cm - Centímetro

Cu - Cobre

CXG - Complexo Xisto - Grauváquico

E - Este

EC - Condutividade elétrica (Electrical Conductivity)

EPA - *Environmental Protection Agency*

ESE - Este Sudeste

Fe - Ferro

Fibro - Tubo de fibrocimento

GMS - *Groundwater Modeling System*

IEA - *International Energy Agency*

IPCS - *International Programme on Chemical Safety*

m - Metro

m³ - Metros cúbicos

mg/L - Miligramas por litro

mg CaCO₃/L - Miligramas de carbonato de cálcio por litro

mgO₂/L - Miligramas de oxigénio por litro

µg /L - Microgramas por litro

µS/cm - Microsiemens por centímetro

Mn - Manganês

N - Norte

Ni - Níquel

NE - Nordeste

NNE - Norte Nordeste

NNW - Norte Noroeste

NW - Noroeste

NTU - *Nephelometric Turbidity Units*

Nv Piez - Nível piezométrico

OD - Oxigénio dissolvido

Pb - Chumbo

Pz1 - Piezómetro 1

Pz1.1 - Piezómetro 1.1

Pz2 - Piezómetro 2

Pz3 - Piezómetro 3

Pz4 - Piezómetro 4

Pz5 - Piezómetro 5

S - Sul

SE - Sudeste

SO₄ - Sulfato

SS - Sólidos suspensos

SSE - Sul Sudeste

SSW - Sul Sudoeste

SW - Sudoeste

W - Oeste

WHO - *World Health Organization*

T - Temperatura

TIN - *Triangulated Irregular Network*

ZCI - Zona Centro-Ibérica

Zn - Zinco

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

No último século assistimos ao triplicar da população mundial. Neste espaço de tempo, a produção industrial foi ampliada em 50 vezes e o consumo de energias não renováveis cresceu num fator de 30 (Karamouz, et al., 2011).

Está-se constantemente à procura de um balanço entre o nosso bem-estar físico, capacidade de gerir os recursos hídricos e as limitações impostas pelo ambiente. Embora o progresso tenha aumentado a qualidade de vida, este tem causado uma significativa destruição ambiental numa magnitude de difícil previsão. Os impactes das mudanças climáticas nos recursos hídricos têm sido devastadores em muitas regiões do mundo. O aumento da frequência e da intensidade de inundações e secas mudaram as capacidades operacionais das infraestruturas concebidas pelo Homem com o objetivo de fornecer serviços para a população, nomeadamente sistemas de abastecimento de água para uso doméstico, industrial ou agrícola. Por sua vez, também mudou a maneira como planeamos e gerimos os recursos hídricos (águas superficiais e subterrâneas).

A água é um recurso sustentável e a necessidade de uma gestão integrada deste recurso está presente nas agendas de todos os governos mundiais. Mais do que nunca os recursos hídricos estão a receber uma especial atenção global. A segurança dos recursos hídricos e o estado de preparação dos mesmos para o consumo público são a causa de muitas preocupações globais.

A água subterrânea é de longe a fonte de água fresca mais abundante nos continentes, fora das zonas polares, seguido dos icebergs, lagos e rios. Cerca de 1,5 biliões de pessoas dependem de águas subterrâneas para abastecer os sistemas de água potável. E estimado que 20% da água mundial captada é proveniente de água subterrânea (Karamouz, et al., 2011).

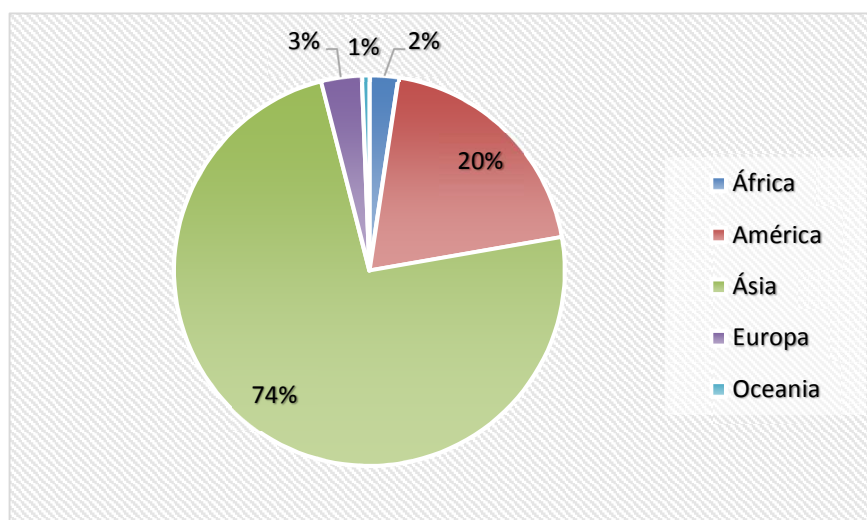


Figura 1: Percentagem de água subterrânea utilizada para irrigação, adaptado de (Siebert, et al., 2010).

A água subterrânea é amplamente usada para irrigação em países com climas áridos e semiáridos (Karamouz, et al., 2011).

A contínua monitorização da água subterrânea é imprescindível para o uso adequado deste recurso hídrico. As medições sistemáticas dos níveis freáticos fornecem informações essenciais necessárias para avaliar as alterações deste recurso ao longo do tempo. Permitem também validar modelos conceptuais capazes de prever o comportamento e tendências dos aquíferos. Sendo de maior importância desenvolver e implementar sistemas integrados de gestão de águas subterrâneas, monitorizando-os e assim avaliar a eficácia dos mesmos e criar programas de proteção deste recurso (Alley & Taylor, 2001).

A contaminação química da água subterrânea constitui uma das maiores preocupações na preservação da qualidade da água subterrânea. Os problemas graves de contaminação química são frequentemente localizados e podem ser causados ou influenciados por contaminação geológica ou antropogénica (Nixon, et al., 2010).

Em Portugal a utilização de águas subterrâneas é regulada pelo Decreto-Lei nº208/08. Através da aplicação deste diploma pretende-se proteger este recurso da deterioração e da poluição química. Essa proteção é particularmente importante no que diz respeito aos ecossistemas dependentes da água subterrânea e à utilização desta para o abastecimento de água destinada ao consumo humano. Este recurso deve ser protegido de forma a evitar deterioração da qualidade, a fim de reduzir o nível de

tratamento de purificação necessário à produção de água potável (Ministério do Ambiente, 2008).

1.2 Objetivos e Importância do Tema

Este estudo de caso advém da preocupação ambiental com a zona de um aterro de resíduos de cinzas de carvão. Esta atenção pela zona em estudo aumentou depois da construção de uma autoestrada. Previamente à construção desta infraestrutura o aterro era considerado inerte, isto é, para efeitos legais considerava-se que as suas propriedades físicas, químicas e biológicas não variavam e assim era pressuposto que estavam em equilíbrio com o meio envolvente. Esta situação manteve-se assim até ao final de 2010.

A recolha de informação no terreno com o intuito de caracterizar a estabilidade do aterro iniciou-se em 2007 e prolongou-se até 2010, ano em que se iniciou a construção da autoestrada (Empresa, 2016). Aquando da construção da autoestrada uma grande parte do aterro foi removido e as cinzas foram transportadas para outros locais. A zona afetada pelas obras de construção foi recoberta com o objetivo de minimizar o impacto ambiental e visual na região (Empresa, 2016).

Após a construção da autoestrada a primeira campanha de recolha de amostras das águas subterrâneas do aterro foi realizada em Janeiro de 2012. Os resultados obtidos demonstram não estar em concordância com os valores recolhidos antes da construção da autoestrada. Nomeadamente os valores da variação dos níveis piezométricos são diferentes dos observados em anos anteriores e também os valores das concentrações da maioria dos parâmetros analisados estão fora da gama de valores esperados quando comparados com os resultados das análises de anos anteriores, antes da construção da autoestrada (Empresa, 2016).

Esta aparente desconformidade justifica um estudo aprofundado do assunto com o objetivo de compreender de que forma a construção da autoestrada terá afetado as propriedades do terreno bem como averiguar o regime de escoamento das águas sob o aterro e assim prever de que forma os elementos analisados se propagam no meio hidrogeológico. A presente dissertação pretende contribuir para esse estudo através da simulação da dispersão dos parâmetros físicos da água subterrânea recorrendo ao *software* GMS - MODFLOW. Para tal foram construídos dois modelos conceptuais da zona do aterro correspondente a dois cenários. O primeiro modelo foi construído com

base nos dados recolhidos entre 2007 e 2010 e, o segundo com os dados de 2012 até 2014, correspondente à fase de pós-construção da autoestrada.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está organizado em seis capítulos, bibliografia e anexos.

No capítulo 1 faz-se a introdução ao tema, explicando a sua importância e o seu objetivo, abordando também os temas científicos relevantes à problemática da dispersão de metais pesados em águas subterrâneas.

No capítulo 2 faz-se um enquadramento do estudo, explicando a importância do mesmo. Descreve-se como funciona uma central termoelétrica indicando quais os seus combustíveis bem como os resíduos que produz, nomeadamente os diferentes tipos de cinzas (fundo e volantes). Explica-se os seus potenciais efeitos adversos para o meio ambiente, bem como os metais pesados presentes nelas. Faz-se também um apanhado das características da qualidade da água.

No capítulo 3 faz-se a descrição morfológica do terreno, em que se enuncia a tipologia das formações rochosas da área em estudo, a sua caracterização geográfica juntamente com os processos hidrogeológicos.

No capítulo 4 descrevem-se, materiais e método utilizados ao longo da criação do modelo conceptual do aterro e apresenta-se uma descrição pormenorizada do *software* utilizado, GMS-MODFLOW, indicando-se ainda as suas vantagens e limitações. Descreve-se também as características mais importantes dos parâmetros que foram analisados também como de que maneira estes nos fornecem informação acerca da qualidade da água subterrânea.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados obtidos, principalmente a maneira como os parâmetros analisados se dispersam sob o aterro de cinzas e uma pequena discussão dos resultados.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões retiradas a partir dos resultados obtidos e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros na continuação desta dissertação.

No Anexo I apresenta-se um guião para prático para a elaboração dos modelos conceptuais, passo a passo.

CAPÍTULO 2. ENQUADRAMENTO E ÂMBITO

2.1 Bacia Carbonífera do Douro

A intensiva exploração de carvão na bacia carbonífera do Douro, durante o século XX deixou dispersas mais de 20 escombreyras que originaram vários impactes ambientais, nomeadamente, a drenagem mineira. A drenagem mineira contribui de forma negativa para o ambiente com a geração de ácido e com o transporte de metais pesados (Santos, 2008). Na região em estudo a drenagem mineira foi gerada não só pelas antigas explorações mineiras mas também pelo armazenamento em pilha no solo de carvão e deposição em aterro das cinzas geradas pela sua combustão numa central termoelétrica que ali funcionou a partir dos anos cinquenta do século XX.

Na figura 2 é possível observar quais as formações geológicas que formam a bacia carbonífera do Douro e as localizações das antigas explorações de carvão.

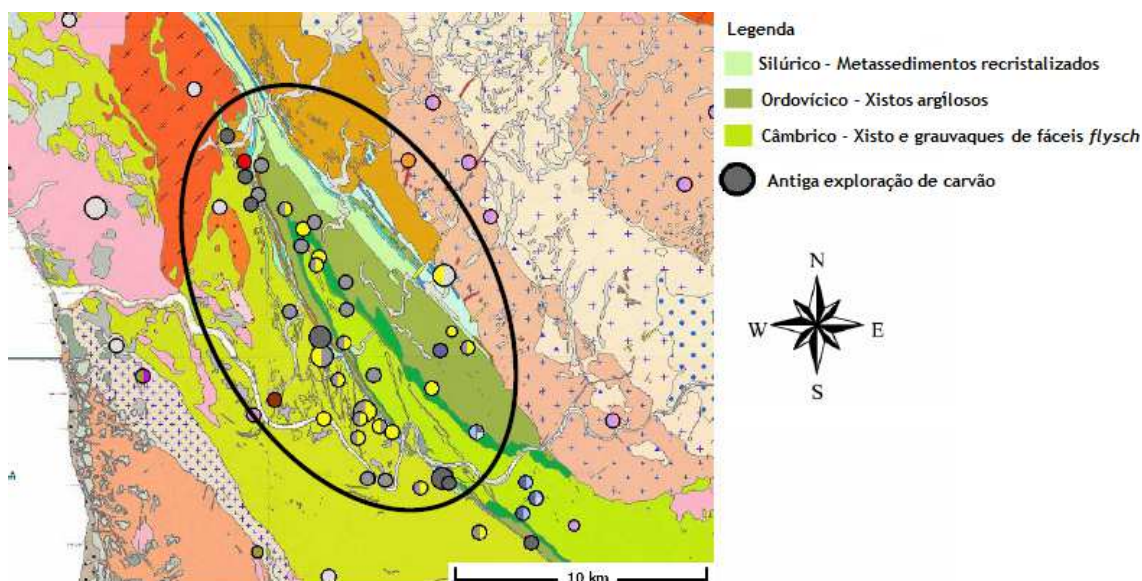


Figura 2: Excerto da Carta Geológica de Portugal evidenciando as principais explorações de carvão na Bacia Carbonífera do Douro, adaptado de (GeoPortal, 2014).

2.2 Descrição e Funcionamento das Centrais Termoelétricas

No final do século XIX foi construída a primeira central energética do mundo (Gugerli, 1996). No entanto, só no início do século XX é que as centrais energéticas começaram a aumentar de dimensão e com isso, adquiriram capacidade para produzir grandes quantidades de energia (Elliot, et al., 1998).

Hoje em dia, muitas centrais elétricas utilizam energia térmica da queima de combustíveis fósseis, como carvão mineral, gás natural ou petróleo para transformar o calor em eletricidade (Stultz & Kitto, 2005).

As centrais que utilizam combustíveis fósseis são denominadas centrais termoelétricas e em muitos países representam a maior parte da produção energética utilizada tendo por isso elevada importância económica. No entanto, a sua produção depende fortemente das reservas naturais destas matérias-primas existentes no mundo. Sendo o carvão o mais abundante dos combustíveis fósseis torna-se, portando, mais barato que os outros combustíveis. No entanto, o seu uso levanta algumas questões ambientais, uma vez que quando queimado liberta diversos poluentes para a atmosfera. Além dos gases, existe a formação de resíduos sólidos orgânicos (cinzas de carvão), produto da combustão do carvão, que podem conter metais pesados como o Zinco (Zn), Níquel (Ni), Arsénio (As), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), que ao serem depositados em aterro muitas vezes são lixiviados e mobilizados para a água subterrânea subjacente a estes aterros. A quantidade desses materiais gerados nas centrais termoelétricas depende muito do seu processo produtivo e principalmente do tipo de carvão utilizado na combustão.

Na figura 3 está representado um esquema simplificado do funcionamento de uma central termoelétrica a carvão.

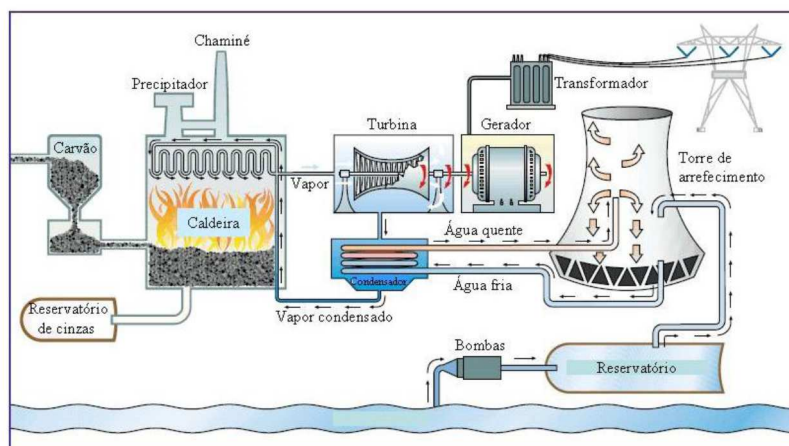


Figura 3: Esquema funcional de uma central termoeletrica a carvão, adaptado de (USGS, 2014).

A produção de energia através das centrais termoeletricas a carvão é constituída primeiramente pela combustão do carvão, que transforma a água de estado líquido a gasoso. Este vapor de água superaquecido circula através de uma rede até às turbinas. As turbinas produzem energia mecânica que é posteriormente transformada em energia eléctrica pelo gerador. A energia gerada é transportada pelas linhas de alta tensão para o sistema de distribuição que a fará chegar até a população. O vapor que sai da turbina é conduzido ao condensador que transforma o vapor em líquido e em seguida é levado até à torre de arrefecimento. A água arrefecida, juntamente com a água que é adicionada na torre de arrefecimento, é novamente transportada ao condensador que por sua vez a converte em vapor seguindo para a caldeira dando início a um novo ciclo (Barbosa, 2008).

2.3 Cinzas de Carvão

Antes do processo propriamente dito de combustão, o carvão passa primeiramente por um pré-tratamento de pulverização. Este processo é complexo e de custo elevado, mas sem isso, haveria uma maior libertação para a atmosfera de óxidos de enxofre, óxidos de nitrogénio e partículas em suspensão (Lora & Nascimento, 2004).

A queima de carvão produz resíduos sólidos inorgânicos. A sua composição física e química depende do seu processo natural de formação (Adriano, et al., 1980). As cinzas do carvão podem conter diversos elementos metálicos (Ferret, 2004). No

entanto, essas cinzas encerram por vezes também elementos radioativos como o urânio e o tório, bem como os elementos das suas séries decaimento radioativo, tais como rádio, radão, polónio, bismuto e chumbo, além de potássio 40 (Dinis, et al., 2011). Estes elementos podem ser libertados com as cinzas no meio ambiente através das chaminés.

A combustão do carvão produz dois tipos de cinzas: i) cinzas de fundo ou escórias, que não são levadas pelos gases e permanecem no fundo dos queimadores, sendo depois removidas, utilizando um equipamento hidráulico próprio para o efeito; ii) cinzas leves ou volantes, que são arrastadas pelo fluxo de gases ficam retidas nos filtros das chaminés. Devido ao seu tamanho, as cinzas volantes podem ser libertadas para a atmosfera através dos filtros sendo dispersas no meio envolvente por ação do vento.

As escórias (de granulometria mais grossa) saem pelo fundo do equipamento, normalmente na forma de lama. As escórias geradas são à volta de 20% das cinzas totais produzidas (Ferret, 2004).

As cinzas de carvão que ficam retidas no filtro e as que se depositam no fundo dos queimadores são em geral tratadas antes de serem depositadas num local próprio para o efeito (aterro) diminuindo o seu impacto direto no ambiente. No entanto, estas cinzas podem também ser consideradas como um recurso amplamente utilizado e explorado (Wang & Hongwei, 2006). As suas aplicações mais importantes são: i) a estabilização de resíduos tóxicos produzidos por outras indústrias; ii) e a sua utilização nas indústrias de materiais de construção, nomeadamente, como aditivos para pavimentos de estradas.

2.3.1 Efeitos ambientais das cinzas de carvão

Os impactos ambientais provocados pelas centrais termoelétricas a carvão, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2012), poderão aumentar nos próximos anos devido a atual exigência energética mundial que deverá subir 60% até 2030. Estima-se que os combustíveis fósseis poderão representar cerca de 85% da produção energética no mundo até 2030 (IEA, 2012).

Para quantificar os aspetos ambientais relacionados com a combustão do carvão nas centrais termoelétricas deve ter-se em conta não só a libertação de gases e poeiras produzidos no processo de combustão mas também todos os processos desde a

produção de carvão até à sua utilização na central, ou seja, é necessário englobar todos os impactos relacionados com a exploração, processamento e transporte do carvão. Por esta razão, muitos países procuram encontrar outras alternativas de produção elétrica capazes de proporcionar grandes quantidades de energia sem perturbar os ecossistemas (Marcuzza & Fonseca, 2004).

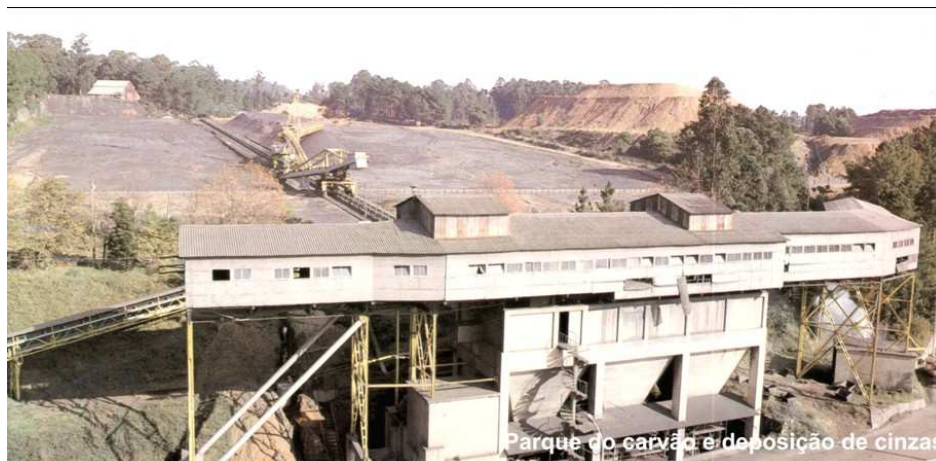


Figura 4: Imagem representativa de terreno para o armazenamento de carvão (Barbosa, 2008).

2.3.2 Metais pesados e seus efeitos na água subterrânea

As cinzas produzidas através da queima de carvão em centrais termoeletricas contêm elementos que por sua vez podem possuir grandes quantidades de metais pesados. Esses metais têm sido alvo de diversos estudos de investigação uma vez que podem causar perigo para a saúde dos humanos e para outros seres vivos, quando presentes em elevadas concentrações no ar, no solo e na água. Contudo, o nível das concentrações desses metais no meio ambiente podem resultar de fontes naturais, p.e. através de processos geológicos, diferentes dos processos antropogénicos como o caso em estudo.

Os metais pesados quando estão presentes no ar, água ou solo, podem entrar na cadeia alimentar e provocar alterações nos organismos. Em alguns casos a quantidade presente nestes recursos pode ultrapassar os limites recomendados. Nestes casos poderá haver problemas de toxicidade levando à morte nos casos mais extremos (Freiberg, et al., 1997). A maioria destes metais pesados são ainda persistentes no solo, prolongando assim o seu efeito nos solos devido à sua capacidade de adsorção pelas fases sólidas (Alloway & Ayres, 1993). A capacidade de adsorção aumenta com a diminuição do diâmetro da partícula e a quantidade de matéria orgânica presente no

solo. Deste modo, os metais pesados apresentam toxicidade reduzida devido à diminuição da sua biodisponibilidade, reduzindo assim o seu impacto ambiental (Alloway, 1990).

O ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdénio (Mo) e cloro (Cl) são considerados micronutrientes visto que desempenham funções importantes no metabolismo das plantas quando presentes em concentrações moderadas (McBride, 1994). O défice desses micronutrientes nas plantas ocorre geralmente quando o seu meio de cultura contém concentrações extremamente baixas desses elementos. Todavia, muitos metais, incluindo os que desempenham funções de micronutrientes, podem atingir determinadas concentrações sendo considerados tóxicos para plantas e organismos. Metais como o chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e cádmio (Cd) são particularmente tóxicos para os animais, por outro lado o cobre (Cu), níquel (Ni) e cobalto (Co) destacam-se como mais tóxicos para plantas (McBride, 1994).

Na literatura consultada há referência ainda a uma extensa lista de metais considerados como a linha da frente de metais potencialmente perigosos para a saúde humana tais como o alumínio (Al), arsénio (As), cobre (Cu), níquel (Ni), zinco (Zn), berílio (Be), antimónio (Sb), cádmio (Cd), crómio (Cr), mercúrio (Hg), selénio (Se), prata (Ag) e titânio (Ti) (McBride, 1994).

Para lá dos efeitos tóxicos diretos no Homem, animais e plantas que estes elementos têm, os metais pesados podem afetar a quantidade e qualidade das comunidades microbianas nos ecossistemas, uma vez que exercem pressão na mesma. Uma grande variedade de estudos concluem que os microrganismos são mais tolerantes em condições que apresentam menor concentração de metais quando comparados com zonas com concentrações mais elevadas (Ellis, et al., 2003).

2.4 Sulfatos e seus Efeitos na Água Subterrânea

Os sulfatos são uma combinação de enxofre e oxigénio e são parte integrante do processo natural de formação de minerais em solos e formações rochosas que contêm água subterrânea. Os minerais dissolvem-se ao longo do tempo e os constituintes são libertados para a água subterrânea (Oram, 2014). Podem também ter origem antropogénica uma vez que são descarregados para o meio ambiente provenientes da indústria mineira, têxtil, papel, entre outros. São amplamente usado na produção de fertilizantes, inseticidas, sabonetes, tratamento de esgotos e

processamento de couro (WHO, 2004). Os sulfatos podem apresentar efeitos laxantes que podem levar à desidratação.

Os sulfatos estão na categoria dos padrões secundários que se baseiam no gosto, odor, cor, corrosividade e formação de espuma. Segundo estes padrões o valor máximo de contaminação admissível é 250 mg/L (Oram, 2014).

2.5 Propriedades da Água

Para caracterizar uma água subterrânea é necessário medir vários parâmetros representantes das propriedades da água, cujos valores permitem classificar a água de acordo com os seus possíveis destinos/utilizações. Alguns destes parâmetros são a temperatura (T), pH, condutividade elétrica (EC), turvação, oxigénio dissolvido (OD), dureza e quantidade de sólidos suspensos (SS) (Swanson & Baldwin, 1965).

Tabela 1: Lista das Propriedade da Água, adaptado de (Swanson & Baldwin, 1965; Bates, 1973; Bruckner, 2014; Lim, 2006; EPA, 2012; Miller, et al., 1988).

Nome	Unidades	Descrição
Temperatura (T)	°C	A temperatura da água é importante em todas as atividades (desde domésticas, agrícolas e industriais). Numa indústria a água libertada para o meio ambiente pode afetar os habitats a jusante. A temperatura também afeta a capacidade de uma água conter oxigénio e a capacidade dos organismos resistirem a certos poluentes.
pH		<p>O pH é uma escala numérica usada em química, bioquímica e outros campos para especificar a acidez ou a alcalinidade de uma solução aquosa. De forma genérica o pH é o logaritmo negativo da base 10 da concentração, medida em moles por litro, de iões de hidrogénio ou também o logaritmo negativo de base 10 da atividade do ião hidrogénio.</p> $pH = -\log_{10}(a_{H^+}) = \log_{10}\left(\frac{1}{a_{H^+}}\right) \quad [\text{eq.1}]$ <p>Onde: a_{H^+} é a atividade do ião hidrogénio.</p> <p>Soluções com pH inferior a 7 são designadas de ácidas e as soluções com pH maior que 7 são alcalinas. Um pH baixo corresponde (solução ácida) a altos valores de $[H^+]$, enquanto que um valor de pH alto corresponde (solução alcalina) a baixos valores de $[H^+]$.</p>

Nome	Unidades	Descrição
Condutividade Elétrica (EC)	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Condutividade elétrica mede a capacidade da água para passar corrente elétrica. Esta capacidade está diretamente relacionada com a quantidade de eletrólitos dissolvidos no fluido. Quanto maior a quantidade de eletrólitos dissolvidos maior a sua condutividade elétrica. Os eletrólitos conduzem a eletricidade devido às suas cargas positivas (catiões) e negativas (aniões). Altos valores de EC indicam que existem altas concentrações de sais dissolvidos (eletrólitos). Estes afetam a adequação da água para usos domésticos, industriais e agrícolas.
Turvação	NTU	Turvação mede a quantidade de partículas suspensas na água. Mede o efeito dos sólidos suspensos na dispersão da luz: quanto maior a intensidade da dispersão da luz, maior a turvação. A turvação torna a água opaca.
Oxigénio Dissolvido (OD)	mgO_2/L ou % de saturação	O oxigénio dissolvido é essencial para o crescimento microrganismos. Quanto menor a quantidade de oxigénio dissolvido a qualidade da água será prejudicada e os organismos começam a morrer. Este processo é denominado de eutrofização. Embora a molécula de água contenha átomos de oxigénio, este não está disponível para os organismos aquáticos.
Dureza	$\text{mg CaCO}_3/\text{L}$	A quantidade de cálcio e magnésio presente numa água determina a sua dureza. Quanto maior a quantidade de cálcio e magnésio dissolvidos maior a sua dureza.
Sólidos Suspensos (SS)	mg/L	Representa a quantidade de sólidos suspensos de solo que se movem ao longo da corrente. Depende da velocidade do fluxo. Águas com fluxo mais rápido vão transportar sedimentos de maiores dimensões. Se uma parcela de terreno for perturbada ao longo da margem de um rio e não forem tomadas medidas para diminuir o seu impacto, o excesso de sedimentos irá prejudicar a qualidade da água.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

3.1 Enquadramento Geográfico da Área de Estudo

Para efeitos de modelação considerou-se uma área, da folha 134 da carta militar de Portugal 1:25000 (figura 1 do Anexo II), onde está localizado um aterro constituído por resíduos e cinzas de carvão.

A área em questão consiste num aterro de cinzas com uma área aproximada de oito hectares. As cinzas depositadas são um conjunto do subproduto da combustão do carvão utilizado no processo de transformação de energia térmica em energia elétrica de uma central e de resíduos provenientes da drenagem mineira. O aterro de cinzas, contruído sobre uma linha de água, compreende duas elevações de material com cerca de 15 a 20 metros de altura em duas plataformas e respetivos taludes, formando dois degraus no sentido do Rio Douro com um talude com cerca de 30 metros de altura (entre a base do aterro e o rio Douro).

A área de estudo contempla também uma área com cerca de três hectares situados a Nordeste do depósito de cinzas e que compreende um conjunto de quatro lagoas de decantação já desativadas. Estas lagoas serviram para efetuar a decantação das cinzas, transportadas por via húmida, sendo o clarificado encaminhado, por meio de um descarregador de superfície, para a linha de água mais próxima e o decantado depositado no aterro de cinzas.

Não foi possível datar com exatidão o início da construção do aterro. No entanto estima-se que 1,3 milhões de metros cúbicos das cinzas lá contidas resultaram da deposição continuada durante 40 anos.

Para o caso de estudo foram considerados dois cenários:

- Cenário A: Aterro sem intervenção desde a cessação da deposição até ao fim de 14 anos;

- Cenário B: Aterro sem intervenção durante 14 anos após a cessação da deposição, seguido da remoção de um terço do volume de resíduos devido ao traçado de uma via de comunicação na área.

A tabela 2 representa uma estimativa do volume de cinzas removidas e adicionadas desde 1956 até 2016.

Tabela 2: Volumes de cinzas adicionadas e removidas do aterro (Empresa, 2016).

VOLUMES ESTIMADOS (m ³)						
	Ano	Ano	Removido	Adicionado	Balanço	Global
Cenário A	1956	1998	47489,17	1458987	1411498	1411498
	1998	2011	25280,16	32965,5	7685,33	1419184
Cenário B	2011	2016	315460,4	41280,3	-274180	1145003

3.2 Geologia e Geomorfologia da Região

A zona apresenta uma morfologia bastante acidentada em que a maior parte das linhas gerais do relevo atual exibem características estruturais herdadas da orogenia varisca que estruturou o substrato geológico regional.

Do ponto de vista geotectónico, a área de estudo insere-se na denominada Zona Centro-Ibérica (ZCI) do Maciço Hespérico.

Na área em análise, aflora a unidade geológica do Câmbrio inferior/ Proterozóico superior denominada Complexo Xisto-Grauváquico (CXG). Do ponto de vista litológico, o CXG é constituído por sedimentos de origem turbidítica, tipo flysch, ou seja, intercalações de xistos argilosos e metagrauvaques de tonalidades variadas (Santos, 2008). Em alguns locais aparecem, por vezes, níveis conglomeráticos intercalados nos xistos e grauvaques, os quais podem apresentar espessura significativa, com os elementos dos conglomerados bem rolados. Estes conglomerados são constituídos essencialmente por calhaus de quartzo e quartzitos encontrando-se ainda, em menor número, elementos de xisto grauvaque. Os calhaus têm geralmente forma elipsoidal e dimensões que, no geral, não ultrapassam os 5 cm. As ações tectónicas posteriores à sua deposição deformaram profundamente os elementos rolados que aparecem achatados ou alongados, dispendo-se paralelamente aos planos de xistosidade.

A intruir o CXG encontra-se um filão dolerítico, de direção NW-SE.

A fracturação local é o reflexo da fracturação regional. Os sistemas mais importantes estão segundo: a) NNE-SSW a N-S e o conjugado ESE-WNW a W-E; b)

sistema NW-SE e o conjugado NE-SW. Este último sistema é o principal responsável pela adaptação das linhas de água (Rebelo, 1975).

Localmente é possível observar, como está expressa na figura 5, quer no substrato onde assenta o depósito de cinzas, quer nas zonas envolventes as seguintes formações:

- Xistos e Grauvaques (X)
- Conglomerados (Xc)
- Filão Dolerítico



Figura 5: Excerto da carta geológica do local do aterro de cinzas, adaptado de (Empresa, 2016).

3.3 Hidrodinâmica

A região em estudo insere-se na unidade hidrogeológica Maciço Antigo Indiferenciado, caracterizada por sistemas de natureza fissurada, sustentados por rochas granitóides e metassedimentares do Maciço Hespérico (APA, 2012). Com efeito, a integração de toda a informação disponível permite indicar que a ocorrência vai depender sobretudo do estado de fracturação e dobramento dos maciços e também

das descontinuidades que podem ocorrer, em especial a existência de filões e contactos geológicos que possam definir eixos de escoamento (Empresa, 2016).

Neste contexto para a zona em estudo ganha particular relevância a análise dos dados e piezometria, visto que é o elemento mais fiável para se poder formular um modelo conceptual de funcionamento (Empresa, 2016).

Os piezómetros são dispositivos usados para medir a pressão dum líquido num determinado sistema hídrico pela medição da altura a que uma coluna do líquido se eleva contra a força gravítica, mede também a pressão da água subterrânea num ponto específico. Estão concebidos para medir a pressão estática (Dunnicliff, 1994). Com esta ferramenta é possível monitorizar os níveis piezométricos de um dado aquífero e recolher amostras da água subterrânea.

Estes níveis piezométricos apresentam variações sazonais. Nas épocas com maior pluviosidade o nível piezométrico de um dado sistema hídrico irá subir devido às infiltrações das águas da chuva e consequentemente nas épocas com menor pluviosidade o nível piezométrico é mais baixo.

CAPÍTULO 4. MODELAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

4.1 Descrição e Funcionalidades do GMS-MODFLOW

Com o rápido crescimento de tecnologias computacionais e a vasta oferta de *software* de simulação, a modelação de águas subterrâneas tem vindo a ser uma ferramenta base para os hidrogeólogos. Os modelos de escoamento subterrâneo, segundo Zhou & Li (2011) têm sido usados como ferramenta de interpretação para:

- (i) Investigar os sistemas dinâmicos da água subterrânea e perceber o padrão de circulação;
- (ii) Simulador de análise para compreender de que maneira um aquífero se comporta em situações de stress;
- (iii) Compreender os mecanismos de recarga, descarga e armazenamento do aquífero;
- (iv) Prever condições fronteira que se possam formar futuramente;
- (v) Prever impactes antropogénicos;
- (vi) Delinear estratégias futuras para solucionar eventuais incidentes;
- (vii) Avaliar os diferentes cenários de desenvolvimento de um aquífero;
- (viii) Avaliar as diferentes políticas a implementar;
- (ix) Ferramenta de comunicação ao público ou às entidades responsáveis pela tomada de decisões.

A primeira tentativa para explicar a maneira de como a água subterrânea circula em aquíferos não confinados foi efectuada por Hubbert, em 1940.

Em 1963 Toth usou pela primeira vez soluções analíticas para estudar o fluxo da água subterrânea de uma pequena bacia de drenagem hipotética. Neste estudo encontrou, teoricamente, a existência de uma hierarquia intrínseca nos sistemas de águas subterrâneas: local, intermediário e regional. A topografia, geologia e clima da zona do aquífero são os fatores que mais influenciam a formação destes três sub fluxos em bacias de águas subterrâneas. Estes fluxos podem ser identificados no terreno através da investigação das zonas de recarga e descarga, mudanças do nível freático, padrões hidroquímicos, isótopos ambientais, vegetação e rede de água superficial (Zhou & Li, 2011; Tóth, 1970; Tóth, 1971). A hierarquia dos fluxos nos sistemas de águas subterrâneas está representada na figura 6.

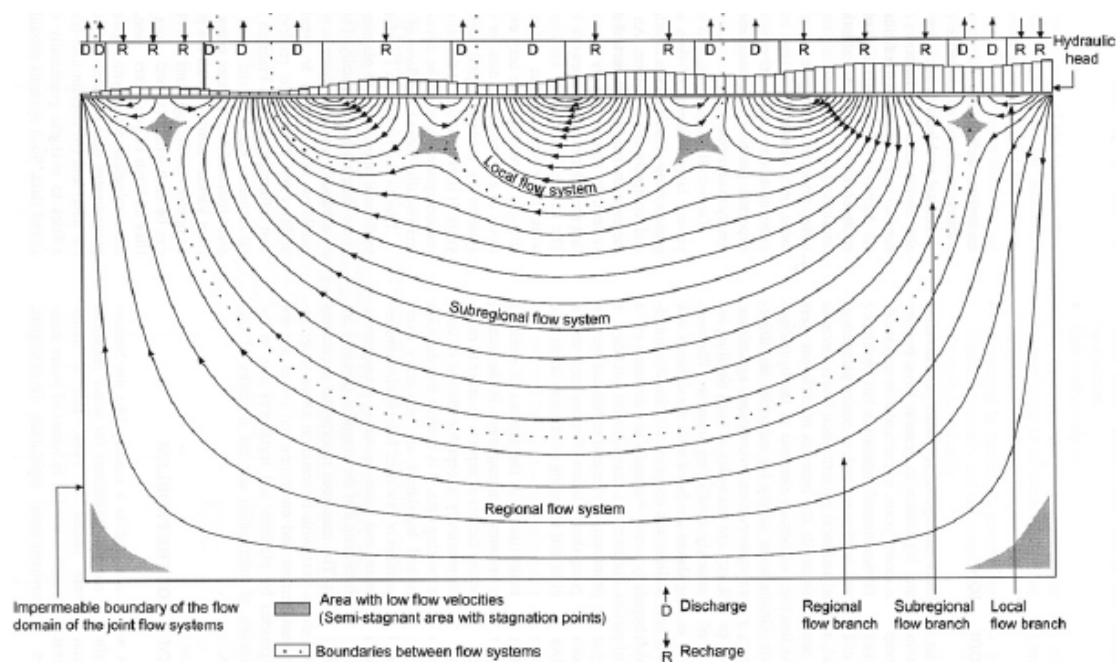


Figura 6: Exemplo da hierarquia de fluxos nos sistemas de águas subterrâneas de acordo com Toth (Tóth, 1971).

Dois anos depois Freeze e Witherspoon foram os primeiros a usar modelos numéricos para simular padrões de fluxo em aquíferos de multicamadas em estado estacionário. Tais modelos numéricos têm a vantagem de simular o fluxo tridimensional de águas subterrâneas em bacias heterogêneas e anisotrópicas. Os seus modelos foram utilizados para analisar os efeitos da configuração do nível freático e a condutividade hidráulica no padrão do fluxo regional e para quantificar a produtividade das bacias. (Witherspoon & Freeze, 1968)

Mais tarde, em 1971 Toth desenvolveu um modelo matemático para sistemas aquíferos em regime transitório para estudar a relação entre as taxas de infiltração, aumento do nível freático e o hidrograma do escoamento base. Este modelo foi mais tarde usado para prever a produção máxima das bacias em função dos padrões de bombagem e as características de recarga e descarga de uma hipotética bacia hidrográfica. (Tóth, 1971)

O MODFLOW é um *software* informático que permite simular o fluxo tridimensional de águas subterrâneas nos aquíferos. Para tal alguns pressupostos têm que ser elementos característicos de um aquífero, tais como: condições de fluxo

saturado, onde a lei de *Darcy* é aplicável, a densidade da água subterrânea é constante e a principal direção da condutividade hidráulica horizontal ou transmissividade não variam dentro do sistema. Estas condições encontram-se presentes na maior parte dos aquíferos para os quais há um particular interesse na análise do fluxo da água subterrânea e o movimento dos contaminantes nela presentes. Para estes sistemas o MODFLOW tem a capacidade de simular uma grande variedade de características e processos hidrogeológicos (Harbaugh, et al., 2000).

A lei de *Darcy* define o fluxo unidimensional num prisma de material poroso, e é expressa através da seguinte equação (Harbaugh, 2005):

$$Q = \frac{KA (h_1 - h_2)}{L} \quad [\text{eq.2}]$$

Onde:

Q é o caudal (L^3T^{-1});

K é a condutividade hidráulica do material na direção do fluxo (LT^{-1});

A é a área da secção transversal (L^2);

h_1-h_2 é a diferença dos níveis freáticos ao longo do prisma paralelo ao fluxo (L);

L é o comprimento do prisma paralelo ao caminho do fluxo (L)

O GMS MODFLOW simula o fluxo das águas subterrâneas em aquíferos recorrendo a modelos dinâmicos que utilizam o método de diferenças finitas na integração das equações às derivadas parciais. Neste método um aquífero é discretizado em blocos retangulares por uma grelha tridimensional. Esta grelha é organizada por linhas e colunas sendo cada unidade geométrica vulgarmente designada de “célula”, como esta representada na figura 7.

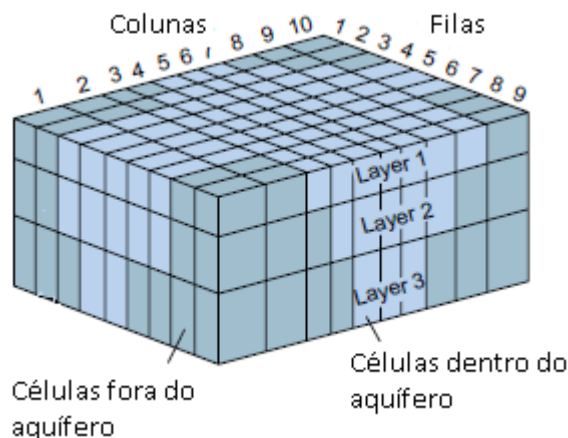


Figura 7: Exemplo de uma grelha tridimensional para simular o movimento tridimensional de uma água subterrânea, adaptado de (U.S. Department of the Interior, 1997).

Para cada célula dentro do aquífero o utilizador especifica as propriedades do aquífero bem como as suas características, isto é, toma como entradas a informação relativa a piezómetros, rios, níveis freáticos e outras características tais como os fluxos de entrada e saída das células correspondentes. Relativamente aos resultados, o MODFLOW fornece informação acerca das elevações do terreno, níveis freáticos, condutividade hidráulica, em que direções o fluido circula, entre outros, de cada célula da rede com exceção das células em que foram especificados os parâmetros de entrada, com o intervalo de tempo. Por fim o modelo pode ser impresso ou guardado em formato digital. Com os resultados obtidos normalmente utiliza-se os níveis freáticos para construir um mapa de contorno para comparação com outros mapas construídos através dos dados obtidos no terreno. (Harbaugh, et al., 2000)

Normalmente os parâmetros a introduzir são ajustados durante a calibração do modelo usando um processo de tentativa-erro. Este processo de calibração pode produzir resultados aceitáveis entre o modelo conceptual e os dados do terreno. Contudo este procedimento consome muito tempo e pode não resultar num parâmetro de valores que melhor representam os dados recolhidos no local e portanto é quase impossível quantificar a estimativa de incerteza nos resultados do modelo conceptual (Harbaugh, et al., 2000).

A figura 8 esquematiza como deve ser feita a abordagem a um modelo conceptual de um aquífero. A sequência dos elementos do plano pode parecer de certa forma que estão dispostos de uma maneira muito invulgar. Por exemplo, a projeção de um modelo de base de dados integrados aparece num dos primeiros passos da

modelação. Este passo provou ser essencial para analisar os dados recolhidos com maior eficácia, e fornecer os *inputs* necessários para a modelação da água subterrânea nas fases posteriores. Existem também dois passos que se focam nos problemas de análise i.e. conseguir compreender as causas das elevadas concentrações dos elementos em questão, que variam de caso para caso. O primeiro bloco: sistema hidrogeológico, baseia-se na interpretação dos especialistas que conhecem a morfologia da zona em questão e na informação recolhida. A lista de problemas e questões relevantes deve ser revista depois de finalizar a modelação e leitura do modelo conceptual de forma a atribuir as prioridades do estudo, como definir o plano de objetivos. Nesta altura os problemas apontados no início do estudo são conciliados com os resultados da modelação. (Maimone, et al., 2003)

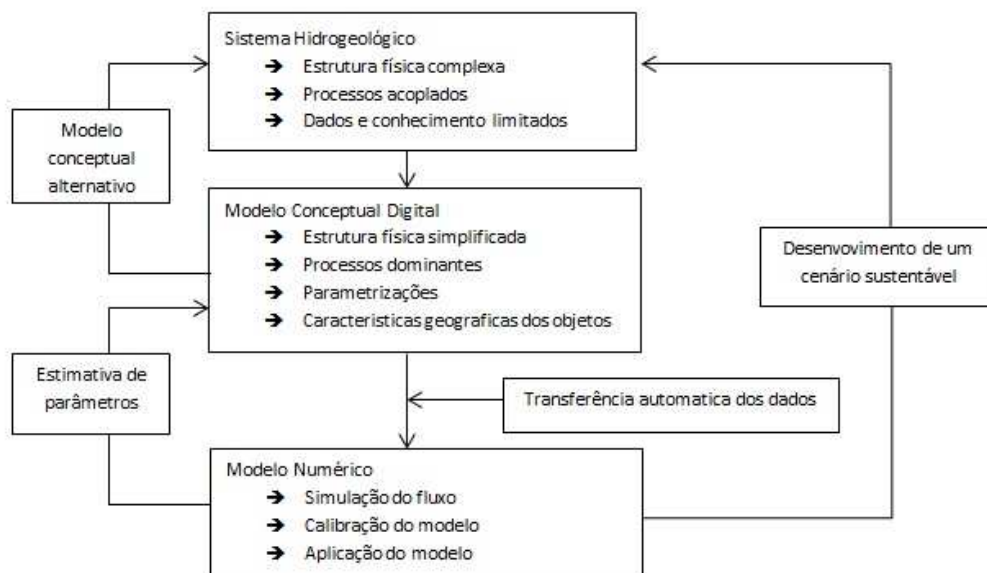


Figura 8: Modelo processual da abordagem a um modelo conceptual, adaptado de (Zhou & Li, 2011).

O modelo preliminar força a equipa de planeamento a compreender os resultados e conceber uma teoria coerente dos mecanismos dinâmicos da água subterrânea. Desta forma minimizam-se os custos que estão normalmente associados a perfurações e recolha de amostras. As intervenções feitas no sistema de forma a recolher informação que caracterize o aquífero serão nos locais onde, segundo o modelo preliminar, os resultados são maus caracterizadores do sistema. (Maimone, et al., 2003). Do ponto de vista dos autores a modelação preliminar precede a recolha de dados no terreno.

Uma vez terminados os estudos de campo, o modelo preliminar é atualizado de forma a refletir a informação adicional, e assim o modelo conceptual vai refletir como a água subterrânea se dispersa no meio em questão. O elemento final inclui a identificação de possíveis soluções e a avaliação de estratégias de gestão. (Maimone, et al., 2003)

4.2 Metodologia Adotada na Construção do Modelo Conceptual

De forma a dar início à modelação do modelo hidrogeológico do aterro de cinzas com recurso ao *software* GMS-MODFLOW desenvolveu-se, a partir do “*user guide*” a metodologia apresentada no anexo I.

O processo de modelação foi estruturado de acordo com o diagrama da figura 8, em que se divide todo o processo em três etapas distintas: sistema hidrogeológico, modelo conceptual digital e modelo numérico. As etapas da criação do modelo conceptual não apresentam uma ordem específica.

Na primeira etapa, (sistema hidrogeológico) são apuradas todas as características físicas do terreno desde o levantamento topográfico, cursos de água, área da zona a modelar, entre outros. O segundo ponto desta primeira etapa está relacionado com os processos acoplados à hidrodinâmica do espaço, desde as infiltrações no terreno até as descargas do mesmo. Ao fazer a recolha desta informação acabámos por descobrir que a informação disponível apresenta algumas limitações, facto que é comum em projetos deste género.

Devido ao facto de existirem estas limitações, o modelo conceptual do terreno é um processo dinâmico que parte de uma representação simplista da realidade apenas cobrindo os processos dominantes do sistema hídrico e se vai aperfeiçoando com o aumento do conhecimento do local e com os contributos dos especialistas em hidrogeologia.

A terceira etapa é a construção do modelo numérico, nesta fase do projeto é realizada a simulação do fluxo do sistema, caso esta simulação esteja muito distante do que ocorre na realidade é feita a calibração do mesmo até se aproximar o mais possível com o caso real.

4.2.1 Passos da Metodologia Adotada

Posto isto passamos às fases de modelação pela ordem que foram concebidas.

O primeiro passo foi importar a carta militar para o GMS-MODFLOW, este passo é comum na construção dos modelos conceituais (Anexo II).

A construção da auto-estrada alterou significativamente a área em estudo, pelo que foi necessário trabalhar com duas edições da folha 134 da carta militar de Portugal (1998 e 2012). Após a importação da respetiva carta militar delimitaram-se as fronteiras do nosso sistema utilizando a ferramenta “*create arc*”. Com esta ferramenta criou-se um polígono, zona sombreada de tom acinzentado (figura 9), que corresponde à nossa área de estudo. Esta fronteira foi delimitada de acordo com as especificações do problema proposto.

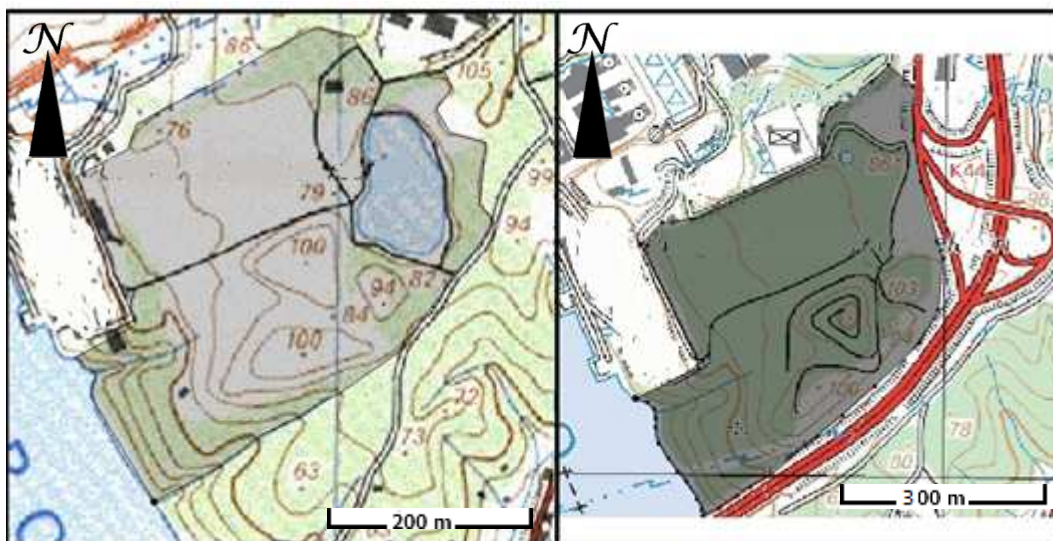


Figura 9: Excerto da carta militar, 1:25000 (folha 134, edições de 1998 e de 2012) do local do aterro de cinzas (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).

Os pontos de amostragem presentes no terreno vão incorporar o nosso modelo conceptual juntamente com os cursos de água existentes, e outras características do género caso façam parte da área de estudo. Neste ponto da modelação é observável que o mapa da esquerda (cenário A) da figura 10 tem quatro piezómetros e o mapa da

direita (cenário B) tem cinco, sendo possível observar o ponto de amostragem designado por tubo de fibrocimento (fibro).

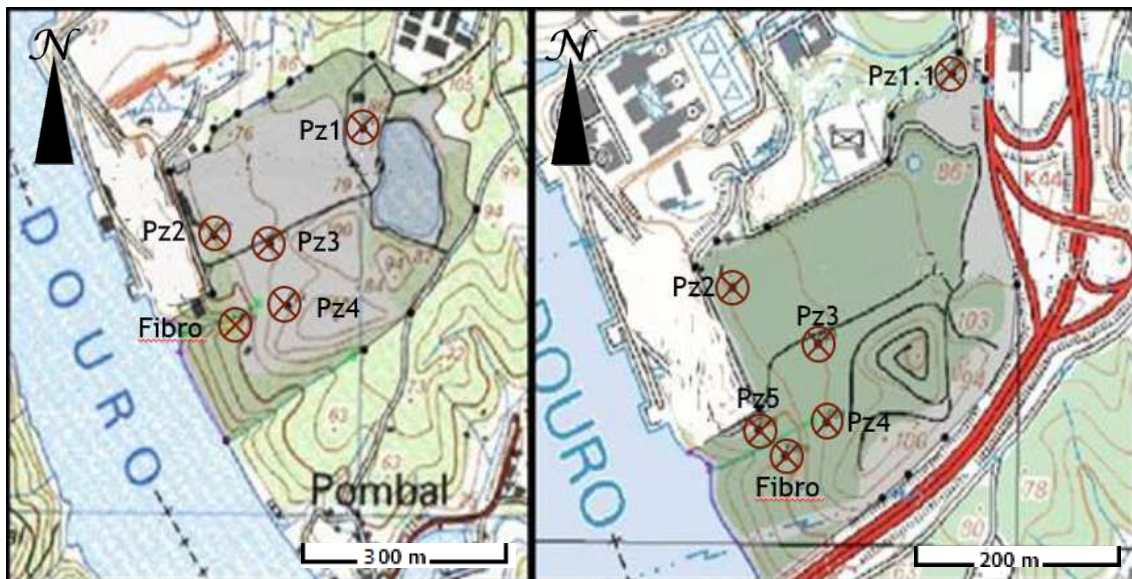


Figura 10: Modelo representativo com os cursos de água e pontos de amostragem (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).

Nesta fase criou-se também um conjunto de pontos de dispersão 3D. Estes pontos serão localizados nos mesmos locais onde estão os pontos de amostragem, será nestes pontos que, mais tarde, serão inseridos os valores dos parâmetros analisados juntamente com os níveis piezométricos.

As coordenadas dos pontos de amostragem estão apresentadas na tabela 3. Nesta tabela é possível observar as coordenadas digitais (GMS-MODFLOW). De notar que as coordenadas digitais dos piezómetros 2, 3 e 4 não são iguais nos dois modelos, isto prende-se com facto de que para abordar o tema proposto foi necessário criar dois modelos conceptuais, um para o cenário A e outro para o cenário B. Para tal utilizaram-se duas cartas militares de anos distintos, ao importar estes documentos para o GMS-MODFLOW eles ficaram com escalas distintas que depois se veio a refletir no valor das coordenadas que são geradas pelo nosso modelador.

Tabela 3: Coordenadas digitais dos pontos de amostragem, adaptado de (GMS-MODFLOW, 2015)

Ponto de Amostragem	Cota (m)	Coordenadas Digitais (GMS-MODFLOW)			
		Antes da construção da autoestrada		Depois da construção da autoestrada	
		X	Y	X	Y
Pz1	85,38	463,9	482,5		
Pz1.1	81,88			403,2	444,0
Pz2	64,81	307,4	383,2	193,0	262,2
Pz3	67,81	366,6	375,2	274,7	214,5
Pz4	70,44	384,7	318,0	282,9	147,5
Pz5	43,9			217,7	141,0
Fibro	38	326,5	299,9	243,3	119,9

Um conjunto de pontos de dispersão 2D é criado para mais tarde ser interpolado e assim o modelo representar a topografia do terreno. Quanto maior o número de pontos criados maior a sua semelhança com a realidade. Como é possível verificar foram criados dois conjuntos, um para cada carta militar (figura 11).



Figura 11: Pontos de dispersão 2D (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).

O próximo passo, visível na figura 12 uma moldura de cor lilás, esta designada por “*Grid Frame*” que vai delimitar as dimensões e localização da grelha primária que representará a hidrodinâmica do aquífero sob o aterro de cinzas

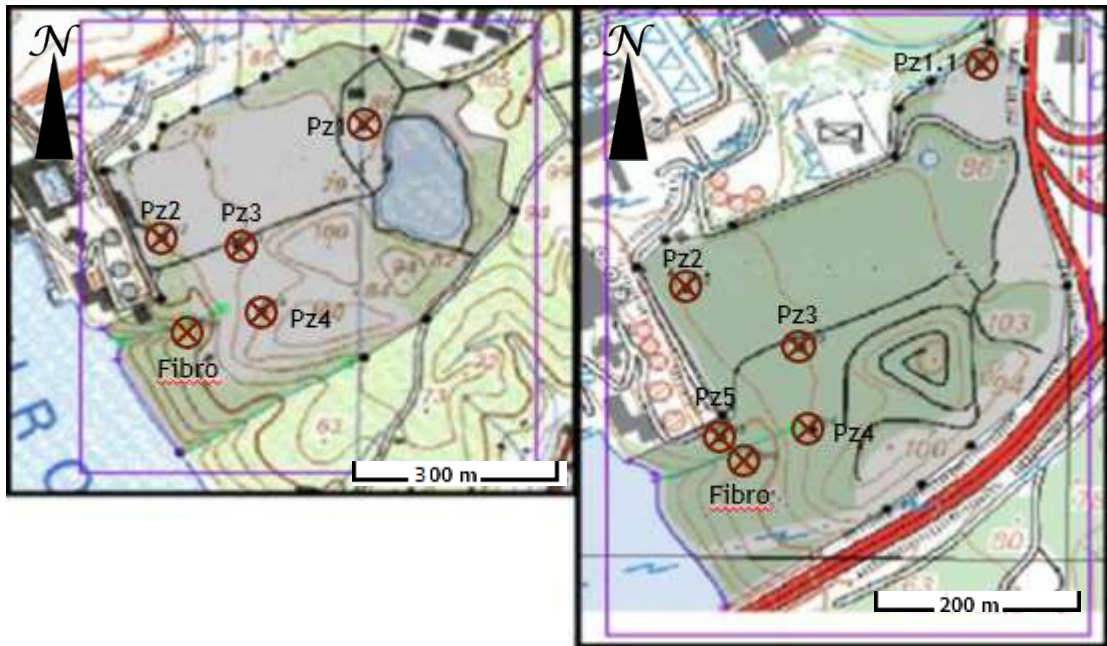


Figura 12: Sobreposição das cartas militares com a “grid frame” (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).

Após a introdução da moldura cria-se uma grelha que se sobrepõe ao aquífero e não ultrapassará os limites da moldura anteriormente definida. Esta irá compreender as células ativas e inativas (figura 13).

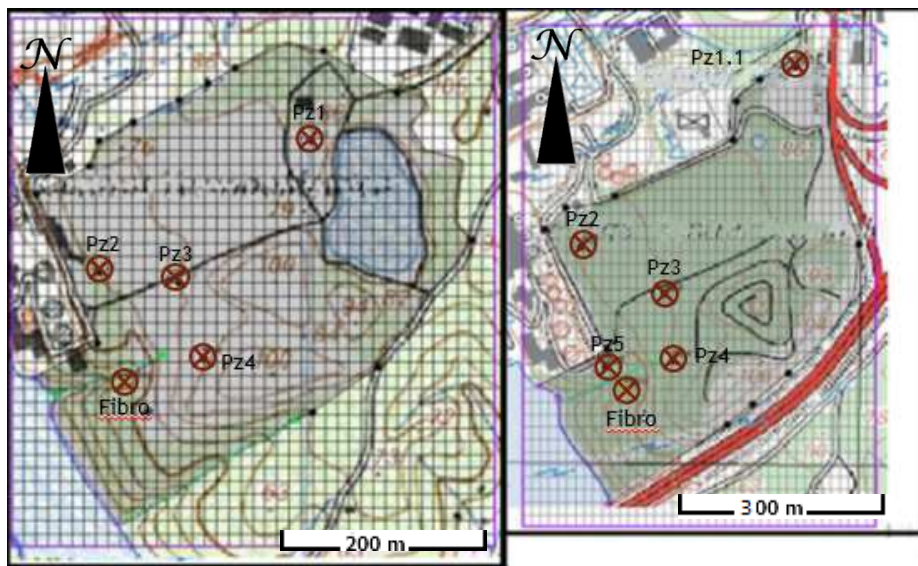


Figura 13: Sobreposição das cartas militares com a grelha primária (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).

De forma a que a grelha não transponha as fronteiras do aterro de cinzas anteriormente definidas, eliminam-se as células inativas do sistema, seleccionando a função “*active cells in coverage*” e assim obtém-se o resultado apresentado na figura 14.

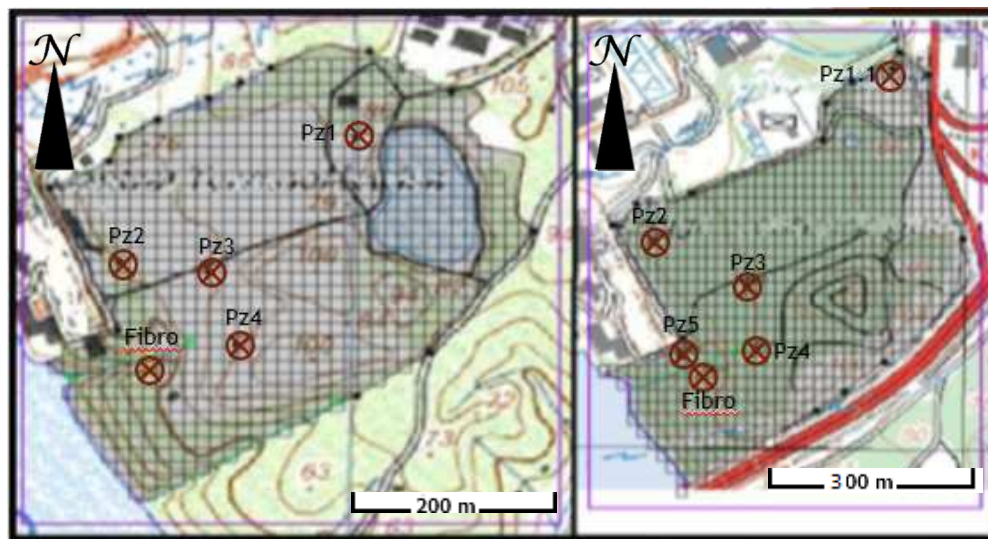


Figura 14: Sobreposição das cartas militares mais grelha refinada, apenas células ativas (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).

4.2.2 Análise e seleção da informação recolhida

A criação dos modelos conceptuais baseou-se em dados recolhidos e cedidos sob sigilo pela empresa responsável pela manutenção do aterro de cinzas.

Os dados disponíveis foram recolhidos entre 2007 e 2014 por amostragem dos piezómetros e do tubo de fibrocimento. Tanto os piezómetros como o tubo de fibrocimento já estavam instalados no local. Para o cenário A utilizaram-se os dados recolhidos entre 2007 até 2010, antes da construção da autoestrada e para o cenário B foram usadas as amostras de 2012 até 2014.

Para o cenário A foram utilizados quatro piezómetros (Pz1, Pz2, Pz3 e Pz4) e um tubo de fibrocimento (fibro). O tubo de fibrocimento permitiu-nos medir os valores das concentrações dos metais pesados em causa e também a concentração em ião sulfato, valor do pH e da condutividade elétrica, os piezómetros fornecem o mesmo tipo de informação com a vantagem de também nos fornecerem os valores dos níveis piezométricos. Nesta campanha temos cinco pontos de amostragem. As amostras foram monitorizadas de acordo com a legislação em vigor, neste caso o Anexo III do Decreto-

Lei 152/2002 e os pontos 19.1 e 19.2 da parte B do Anexo III do Decreto-Lei 183/2009 serviram de guia para a recolha das amostras da água subterrânea (Empresa, 2016; Ministério do Ambiente, 2002; Ministério do Ambiente, 2009). Nesta campanha assumiu-se que o tubo de fibrocimento drenava lixiviado, assim o método de monitorização foi feito de acordo com ponto 16.1 da parte B do Anexo III do Decreto-Lei 183/2009 (Ministério do Ambiente, 2009; Empresa, 2016). Toda a metodologia de recolha de amostras tem sido feita conforme a metodologia adotada em 2007.

No cenário B as recolhas das amostras foram realizadas de acordo com um novo plano de monitorização, neste plano definiu-se a instalação de um novo piezometro (Pz5) e a realocização do Pz1 que passou a ser denominado de Pz1.1. Outra alteração foi a origem do material que era drenado pelo tubo de fibrocimento, constatou-se que este tubo drenava águas subterrâneas e não lixiviado como era anteriormente admitido (Empresa, 2016).

Esta etapa do processo da modelação do aterro de cinzas consiste na recolha de informação sobre a zona a modelar (sistema hidrogeológico) através da consulta dos relatórios técnicos, cartas militares, informação fornecida pelos trabalhadores da empresa.

Os parâmetros analisados foram cuidadosamente selecionados de acordo com os resultados obtidos nas amostras recolhidas durante as campanhas de amostragem, uma representativa do cenário A e outra representativa do cenário B.

Verificou-se existir alguma discordância entre os resultados das duas campanhas, pois em alguns casos os valores de alguns parâmetros aumentaram drasticamente da primeira para a segunda campanha.

Outros elementos foram selecionados por serem bons elementos representativos da qualidade do fluido em que se insere bem como os seus efeitos adversos quer para os animais, plantas e humanos; tais como o pH e a condutividade elétrica.

A quantidade dos dados disponíveis foi também um fator fulcral na seleção dos parâmetros, porque para iniciarmos a simulação de como os elementos se propagam na água subterrânea é necessário um número mínimo de amostras, cinco pontos de amostragem.

Após a recolha e seleção da informação necessária para a construção do modelo conceptual passamos para a projeção do mesmo.

As tabelas 4 e 5 representam os parâmetros analisados de acordo com a respetiva campanha de amostragem. Ao observar as tabelas verifica-se que existe mais informação disponível no cenário A do que no cenário B.

Tabela 4: Compilação das concentrações dos metais pesados, níveis piezométricos, pH e condutividade elétrica. Cenário A, adaptado de (Empresa, 2016).

Parâmetro		Pz1	Pz2	Pz3	Pz4	Fibro
pH	Min	5,1	4,3	3,6	3,4	3,1
	Max	5,3	5,1	5,8	4,3	3,4
As (µg/L)	Min	4	4	4	4	4
	Max	6	6	32	22	42
Pb (µg/L)	Min	5	4	4	34	4
	Max	11	5	140	250	5
Ni (µg/L)	Min	6	160	2 800,00	860	900
	Max	34	220	6 600,00	5 600,00	1 410,00
Condutividade eléctrica 25°C (µS/cm)	Min	214	486	3 890,00	3 980,00	2 450,00
	Max	227	624	5 600,00	5 380,00	2 900,00
Nv. Piez (m)	Min	14,75	25,94	20,74	26,06	
	Max	16,02	27,5	22,36	27,75	

Tabela 5: Compilação dos valores da concentração, níveis piezométricos, valores de pH e condutividade eléctrica. Cenário B, adaptado de (Empresa, 2016).

Parâmetro		Pz1.1	Pz2	Pz3	Pz4	Pz5	Fibro
pH	Min	5,20	3,90	3,50	3,90	5,60	2,90
	Max	5,80	5,10	3,80	4,10	6,10	5,40
SO ₄ µg/L	Min	1,68E+05	2,38E+05	4,29E+06	3,10E+06	7,35E+05	1,50E+06
	Max	2,04E+05	3,47E+05	4,86E+06	3,88E+06	1,18E+06	2,20E+06
Al (µg/L)	Min	23,00	5,50E+02	1,17E+05	7,40E+04	28,00	1,10E+03
	Max	57,00	1,10E+04	1,90E+05	8,20E+04	1,70E+03	2,30E+04
Cu (µg/L)	Min	4,00	4,00	630,00	310,00	4,00	18,00
	Max	5,00	68,00	860,00	390,00	18,00	99,00
Fe (µg/L)	Min	8,00	1,20E+03	1,05E+05	1,60E+05	1,90E+02	1,70E+04
	Max	90,00	1,70E+04	3,30E+05	4,20E+05	9,50E+04	1,13E+05
Mn (µg/L)	Min	1,60E+03	5,80E+03	5,10E+05	2,80E+04	1,60E+04	2,70E+03
	Max	2,60E+03	9,60E+03	6,20E+05	3,80E+05	2,70E+04	2,10E+05
Zn (µg/L)	Min	10,00	210,00	7,00E+03	90,00	110,00	1,20E+03
	Max	31,00	800,00	1,00E+04	5,40E+03	1,80E+03	1,70E+03
As (µg/L)	Min	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Max	4,00	4,00	44,00	24,00	5,00	96,00
Ni (µg/L)	Min	4,00	113,00	5,00E+03	3,00E+03	76,00	1,00E+03
	Max	13,00	390,00	5,60E+03	3,20E+03	950,00	1,21E+03
Condutividade eléctrica 25 °C (µS/cm)	Min	479,00	570,00	4,95E+03	4,00E+03	1,43E+03	2,55E+03
	Max	554,00	748,00	5,26E+03	4,29E+03	2,03E+03	2,89E+03
Nv Piez (m)	Min	20,72	13,7	15,44	24,62	4,52	
	Max	23,91	27,29	22,57	27,41	12,68	

4.2.3 Modelação do Sistema Hidrodinâmico

A terceira etapa do procedimento é destinada à modelação do fluxo da água subterrânea e à verificação dos valores resultantes. Os resultados obtidos indicam a quantidade do fluxo da água subterrânea, como se propagam os contaminantes no meio em que estão inseridos. Com estes valores faz-se a calibração do modelo até este se parecer o mais próximo da realidade, ao calibrar os parâmetros introduzidos no modelo aquando da sua criação.

Para converter o modelo conceptual num modelo numérico há que escolher 2 pacotes de cariz obrigatório em qualquer que seja o caso de estudo. Um deles é o

pacote de fluxo, neste caso foi escolhido o *Layer Property Flow* (LPF) e o outro é o pacote que corresponde ao *solver* neste caso foi o *Strongly Implicit Procedure* (SIP),

LPF - Calcula o fluxo célula a célula. Os dados a inserir neste pacote incluem o tipo de camada e os atributos em cada célula, tais como coeficiente de armazenamento e a transmissividade do aquífero.

SIP - É usado para resolver equações diferenciais pelo método das diferenças finitas em cada intervalo dos períodos de stress do MODFLOW. Os períodos de stress são também caracterizados pelo intervalo de integração. Um período de stress pode ser dividido em vários *steps* ou apenas um.

Todo este processo é um processo cíclico iterativo como a figura 8 indica, pois para perceber a hidrogeologia do terreno transformamo-lo num modelo conceptual que será refinado até este reproduzir o mais possível a situação real.

A técnica de interpolação utilizada foi a interpolação pelo inverso da distância (IDW). Este método é baseado na suposição que a superfície é mais influenciada pelos pontos mais próximos e menos influenciada pelos pontos mais afastados. A superfície interpolada é a média ponderada da informação disponível nesse ponto, a ponderação atribuída a cada ponto diminui à medida que a distância da interpolação aumenta (Aquaveo, 2011).

O método de interpolação utilizado foi *shepards method*, é a forma mais simples de IDW. Neste método são necessários no mínimo cinco pontos (valores onde parâmetros são medidos). Outros métodos de interpolação estão disponíveis no GMS-MODFLOW mas para utilizá-los é necessário maior abundância de dados.

A equação usada na interpolação é dada pela seguinte fórmula:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n W_i f_i \quad [\text{eq.3}]$$

Onde:

$F(x, y)$ é o resultado para o ponto de coordenadas XY

n é o número de pontos usados para interpolar

f_i são os valores observados nos pontos de amostragem

W_i é peso atribuído a cada ponto (ou célula)

A forma clássica de atribuição dos pesos a cada ponto é dada pela seguinte equação:

$$W_i = \frac{h_i^{-P}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-P}} \quad [\text{eq.4}]$$

Onde:

P é um número arbitrário real positivo chamado expoente do peso ponderado e tem o valor padrão de 2, que foi o utilizado neste projeto

h_i é a distância do ponto até à célula interpolada

A fórmula acima [eq.4] é a forma clássica no entanto o GMS utiliza a seguinte equação para calcular a interpolação IDW:

$$W_i = \frac{\left[\frac{R - h_i}{Rh_i} \right]^2}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{R - h_i}{Rh_i} \right]^2} \quad [\text{eq.5}]$$

Onde:

R é a distância do local da interpolação até o ponto mais distante

O peso atribuído a cada célula é uma função da distância Euclidiana e é radialmente simétrica em relação a cada ponto. Como resultado a superfície interpolada é de alguma forma simétrica em cada ponto e tende em direção aos valores médios da informação dos pontos entre as células. É um método que tem sido largamente usado devido a sua simplicidade/facilidade de implementação.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Tratamento dos Dados

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos, a análise geoestatística das variáveis em estudo e a análise topográfica do terreno, abordando os aspetos mais relevantes para esta dissertação.

O levantamento topográfico foi feito com o objetivo de caracterizar e descrever o quão acentuado é o relevo da zona do aterro de cinzas. Para o efeito, foram analisados os excertos da carta militar da zona em questão e foi feito o levantamento da informação necessária. Essa informação foi posteriormente inserida no simulador GMS-MODFLOW e fez-se correr o programa para obter os resultados.

Na análise geoestatística criou-se um modelo de dispersão espacial das concentrações dos metais em estudo e dos sulfatos e representaram-se os parâmetros utilizados para a caracterização de uma água.

Tanto a análise topográfica como a análise geoestatística foram realizadas usando o *software* GMS-MODFLOW 8.0.

Apenas para o pH, condutividade elétrica, arsénio e níquel é possível fazer uma análise comparativa das duas campanhas de amostragem (cenário A e cenário B), visto que o interpolador usado necessita pelo menos cinco pontos de amostragem. Os restantes elementos não possuíam dados para realizar a interpolação no cenário A. Os níveis de chumbo apenas foram interpolados para o cenário A, devido à falta de dados para este parâmetro no cenário B.

5.2 Levantamento Topográfico

5.2.1 Construção e triangulação (TIN: *Triangulated Irregular Network*)

As TIN's são utilizadas para fazer a discretização espacial de uma superfície e são formadas pela conexão de um conjunto de pontos de coordenadas XYZ entre si e com as extremidades para criar uma rede de triângulos. As TIN's podem ser usadas para representar a superfície de uma unidade geológica ou uma superfície definida por uma função matemática (Aquaveo, 2011). Os pontos que formam a TIN são o conjunto de pontos de dispersão 2D anteriormente explicados, esta função cria triângulos entre os pontos 2D que mais tarde formarão o modelo da superfície do terreno.

A figura 15 é representativa da superfície do aterro de cinzas. É possível observar que a TIN que representa a zona do aterro em 2015 tem mais pontos e consequentemente a sua semelhança com a realidade será maior que a TIN que representa o terreno em 2008. Quanto maior o número de pontos maior será o número de triângulos formados e consequentemente menor será a área destes triângulos, e obtendo-se assim uma TIN mais detalhada do modelo em questão, como é possível observar na figura 15.

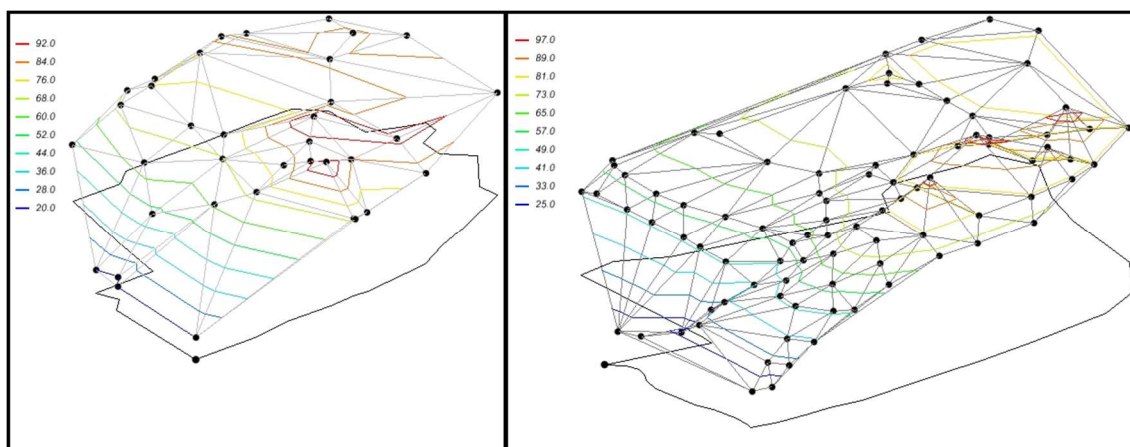


Figura 15: TIN representativa do modelo da superfície da área em estudo. Escala numérica em metros (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).

5.2.2 Mapa das elevações do aterro de cinzas

Os mapas que estão exibidos na figura 16 representam as elevações do terreno. Tal informação é obtida da seguinte forma: cria-se o conjunto de pontos 2D, interpolámo-los e ao fazer correr o MODFLOW este vai gerar valores previstos para as cotas do terreno. Esta informação varia conforme o conjunto de dados inseridos.

Esta figura mostra com clareza como variam as cotas na área de estudo apenas com a informação fornecida pelas cartas militares. É uma ferramenta extremamente útil para obter um aspeto visual da região apenas pela análise da respetiva carta militar. Esta informação depois pode ser atualizada de forma a criar um mapa que represente com maior rigor o relevo da área em estudo.

Os dados utilizados para a construção deste mapa são os mesmos dos utilizados para a construção das TIN's, contudo ambos fornecem perspetivas diferentes do terreno.

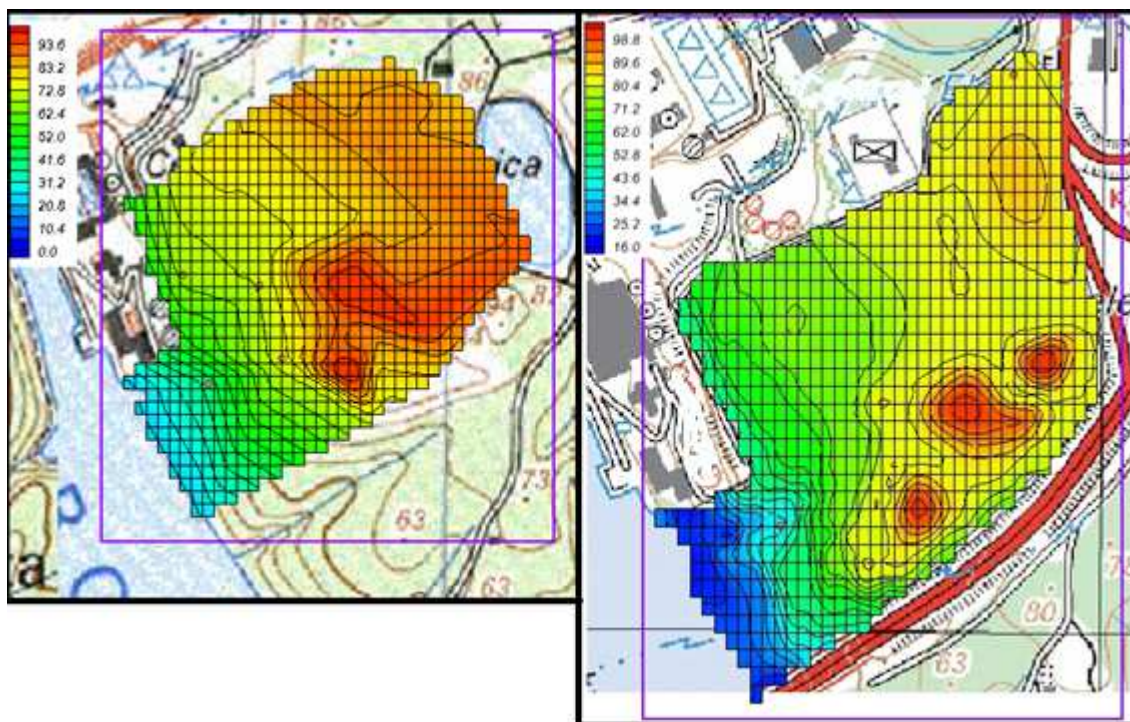


Figura 16: Mapa das elevações da área em estudo. Escala numérica em metros (esquerda: Cenário A; direita: Cenário B).

5.3 Parâmetros Físicos de Caracterização da Água Subterrânea

5.3.1 Condutividade elétrica

Na figura 17 estão representados os resultados obtidos para a condutividade elétrica relativamente ao cenário A.

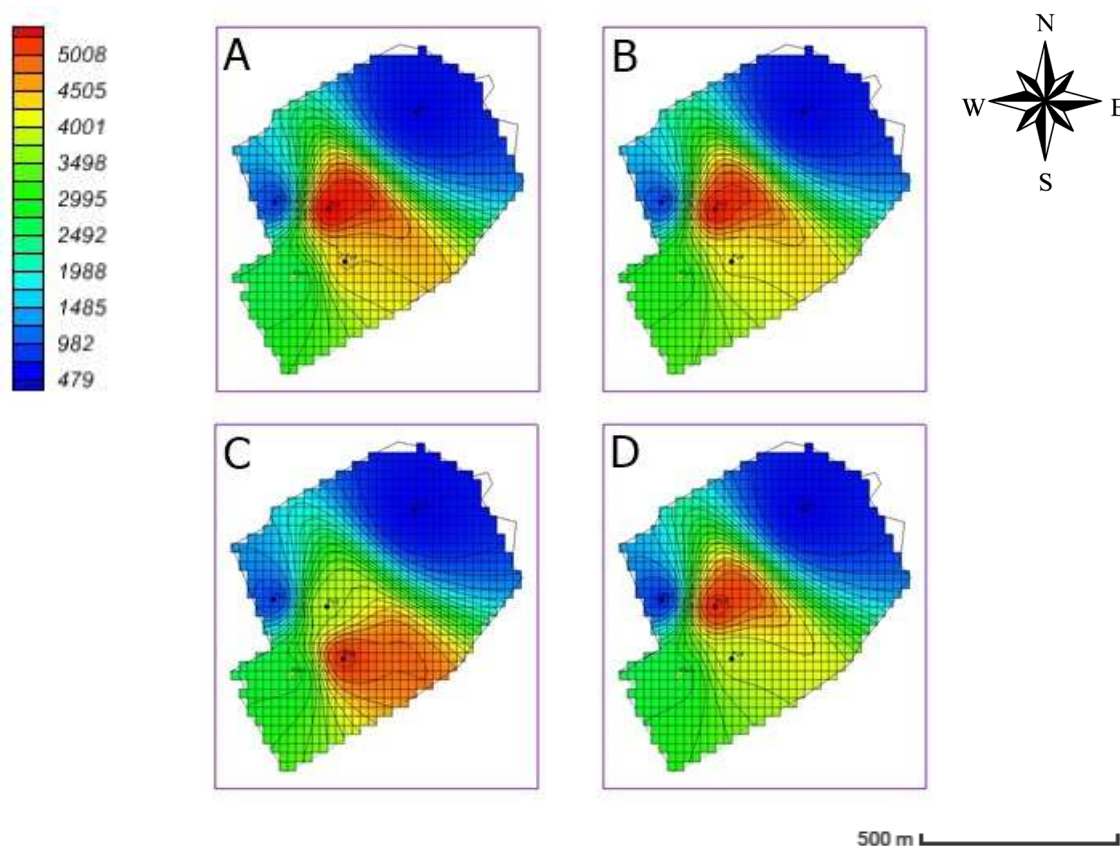


Figura 17: Mapa da distribuição dos valores da EC, em $\mu\text{S}/\text{cm}$; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.

Para este cenário a zona onde está instalado o Pz1 é a que apresenta o menor valor para a condutividade elétrica seguido do Pz2 e logo a seguir o tubo de fibrocimento. Este aspeto é visível em todas as amostragens. Por outro lado, nota-se que os locais onde a condutividade é mais elevada variam. Em três das amostras (Figura 17A, 17B e 17D) o local que apresenta maior EC é no centro do aterro. Já na amostra representada pela figura 17C mostra que o local mais contaminado é onde se localiza o Pz4. É também visível que a propagação deste parâmetro se desloca de NNW para SSE.

Na figura 18 estão representados os resultados obtidos para a condutividade elétrica relativamente ao cenário B

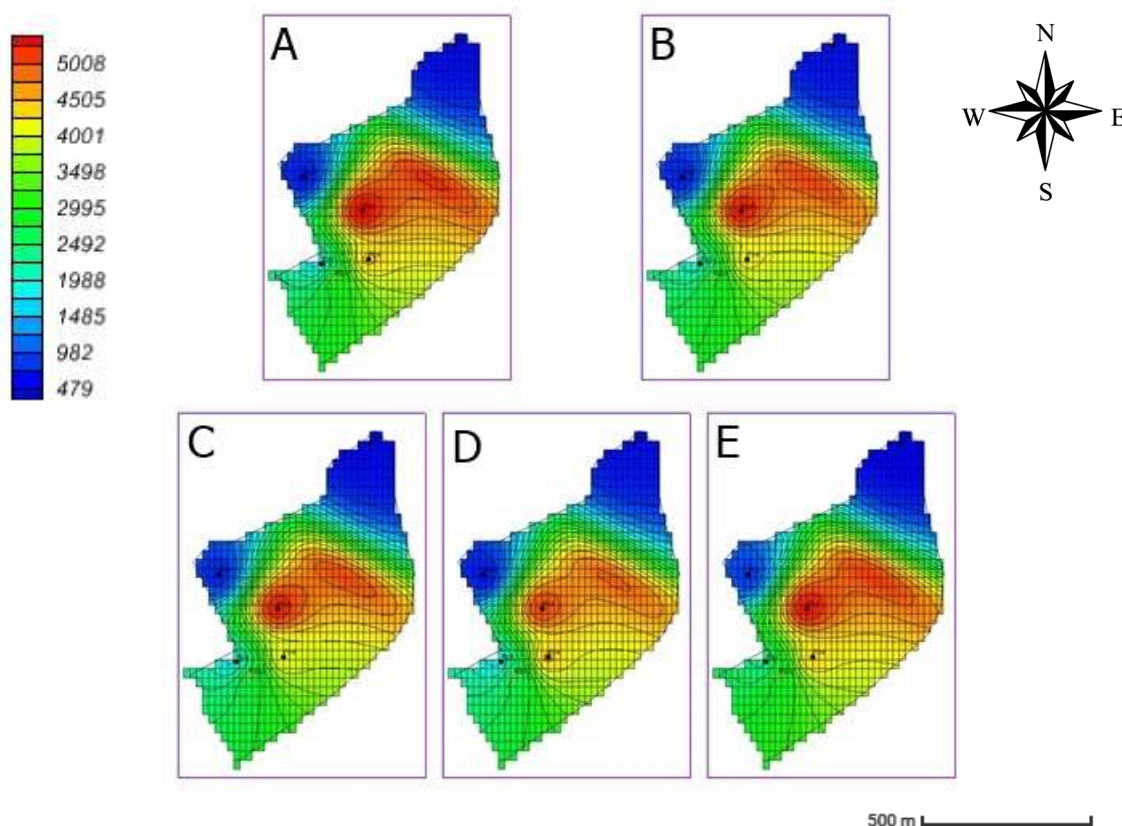


Figura 18: Mapa da distribuição dos valores da EC, em $\mu\text{S}/\text{cm}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014

Neste caso o padrão de distribuição da condutividade elétrica é semelhante entre todos os ensaios, observando-se sempre que o local onde este parâmetro apresenta valores mais elevados é onde está localizado o Pz3 e tende a propagar-se na direção NNE.

Em ambos os cenários o local com maior quantidade de metais dissolvidos é no centro do aterro, apenas com exceção da amostra recolhida em Agosto de 2009.

5.3.2 pH

A figura 19 apresenta a variação espacial do pH relativa ao cenário A.

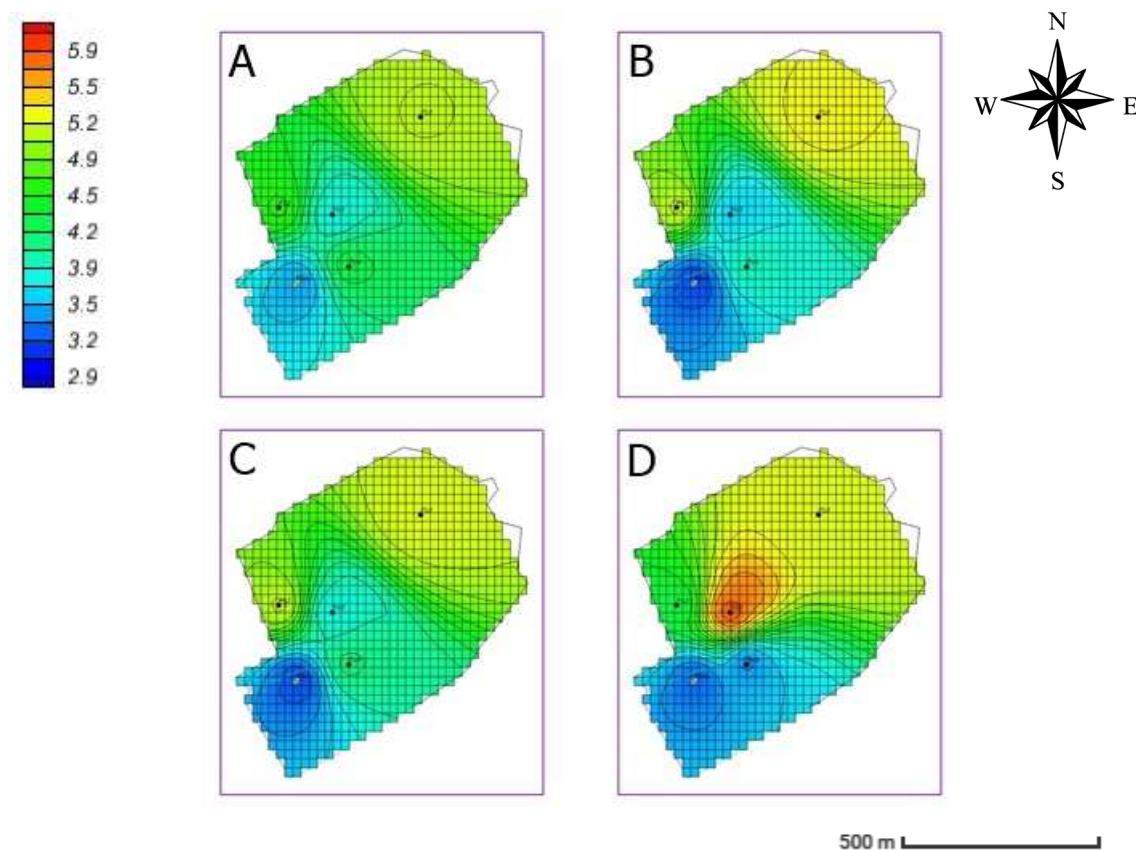


Figura 19: Mapa da distribuição dos valores do pH; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.

Da observação desta figura conclui-se que o drenado pelo tubo de fibrocimento é o que apresenta o pH mais baixo em todos os pontos de amostragem.

Contrariamente ao que era expectável a amostra retirada em 2010 revela uma deslocação da zona em que o pH é mais elevado, como é observável na figura 19D.

É também visível que o valor do pH na zona onde está situado o Pz4 na amostragem de 2010 diminui quando comparado com as amostras recolhidas em nos anos anteriores.

Os mapas da figura 20 referem-se aos valores do parâmetro pH relativamente ao cenário B.

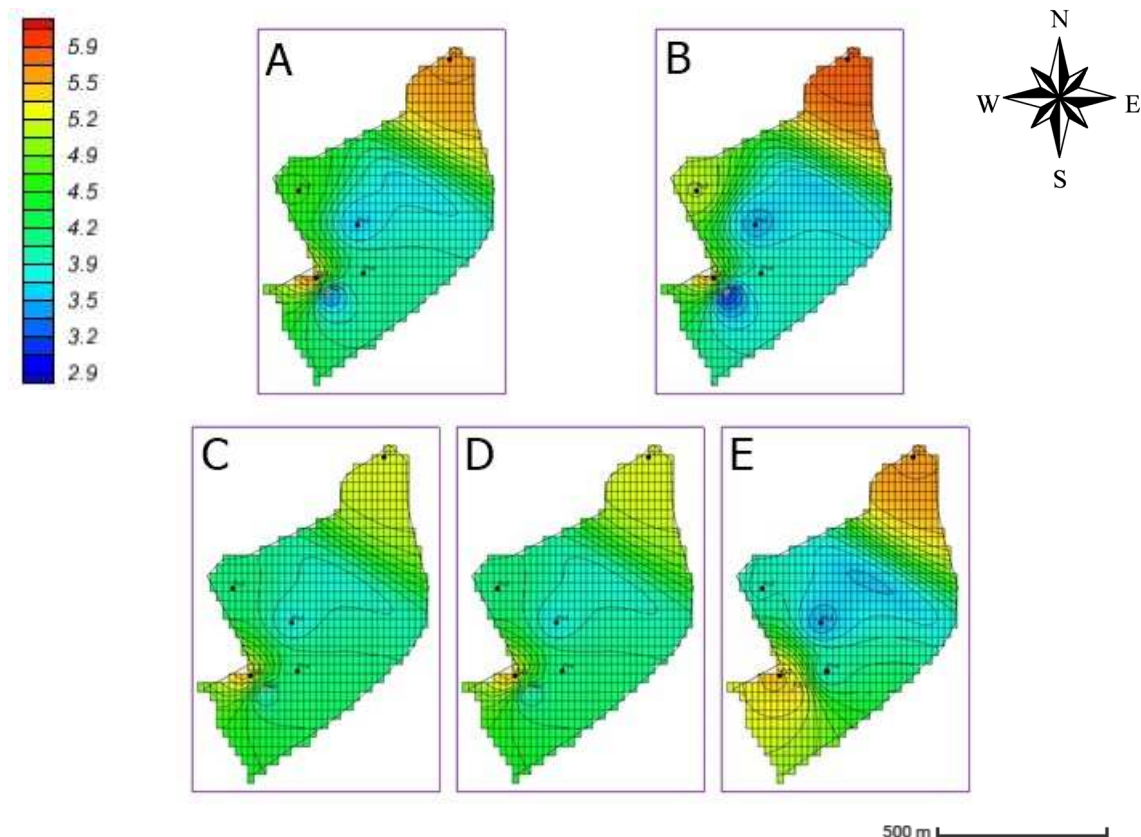


Figura 20: Mapa da distribuição dos valores do pH; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.

Os valores de pH na zona onde está situado o Pz1.1 e Pz5 são os que apresentam os valores mais altos, contudo continua situado na gama de valores que caracterizam o pH ácido. Aspeto evidenciado em todas as etapas da campanha de amostragem.

O drenado pelo tubo de fibrocimento tem o pH mais baixo em todas as amostras recolhidas, com exceção da amostra recolhida em 2014, neste caso o local onde a água apresenta maior acidez é onde está localizado o Pz3.

5.4 Metais Pesados Detetados na Água Subterrânea

Nesta secção apresentam-se por ordem alfabética os resultados obtidos para os metais pesados.

5.4.1 Alumínio

Na figura 21 estão mapeados os valores da concentração em alumínio referentes cenário A.

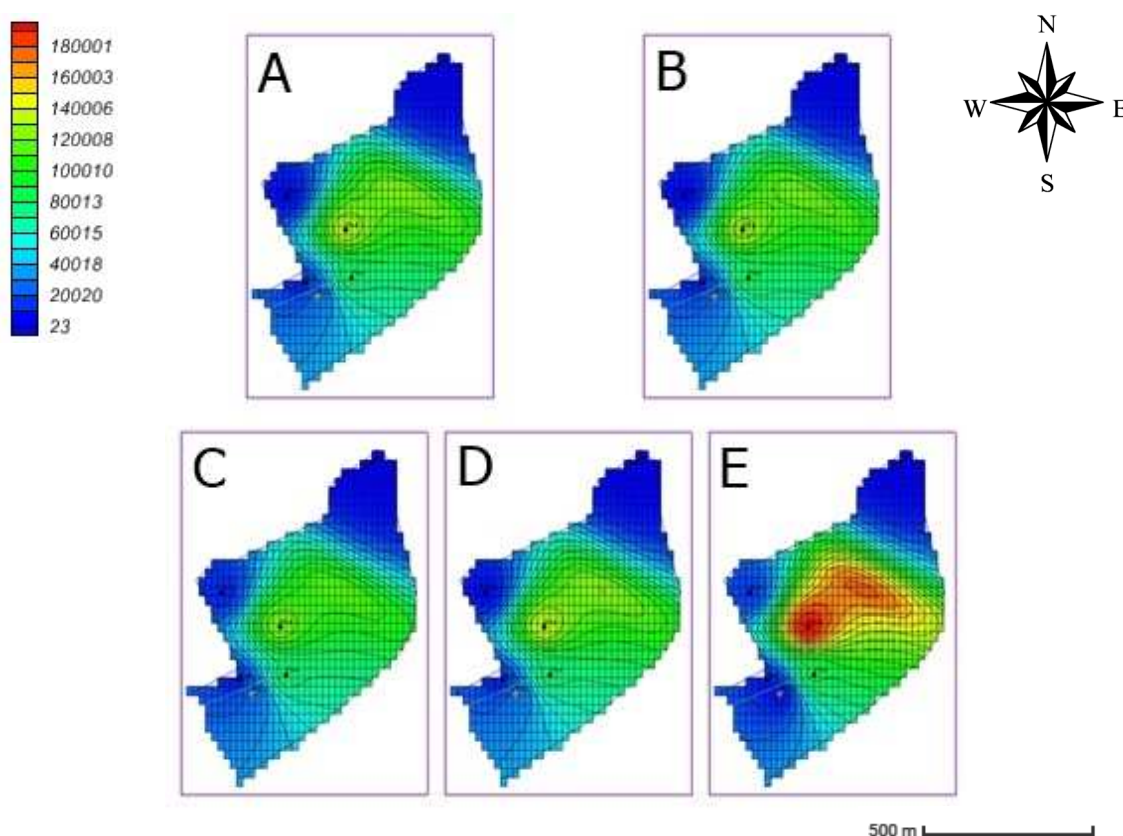


Figura 21: Mapa da distribuição dos níveis de Alumínio; em $\mu\text{g/L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014

Como é possível observar na figura 22 a maior concentração de alumínio situa-se no mesmo local onde está instalado o Pz3, facto que ocorre nas cinco campanhas de amostragem. Os Pz1.1, Pz2, Pz5 e o tubo de fibrocimento apresentam concentrações de alumínio na água muito baixas quando comparadas com o Pz3 e Pz4.

A concentração de alumínio observada no Pz4 encontra-se na mesma gama de valores que a observada no Pz3 exceto na amostragem de Março de 2014, em que os valores de alumínio são muito mais altos no Pz3 do que no Pz4.

5.4.2 Arsénio

Os resultados obtidos para a distribuição do arsénio observada nos cenários A e B encontram-se nas figuras 22 e 23, respetivamente.

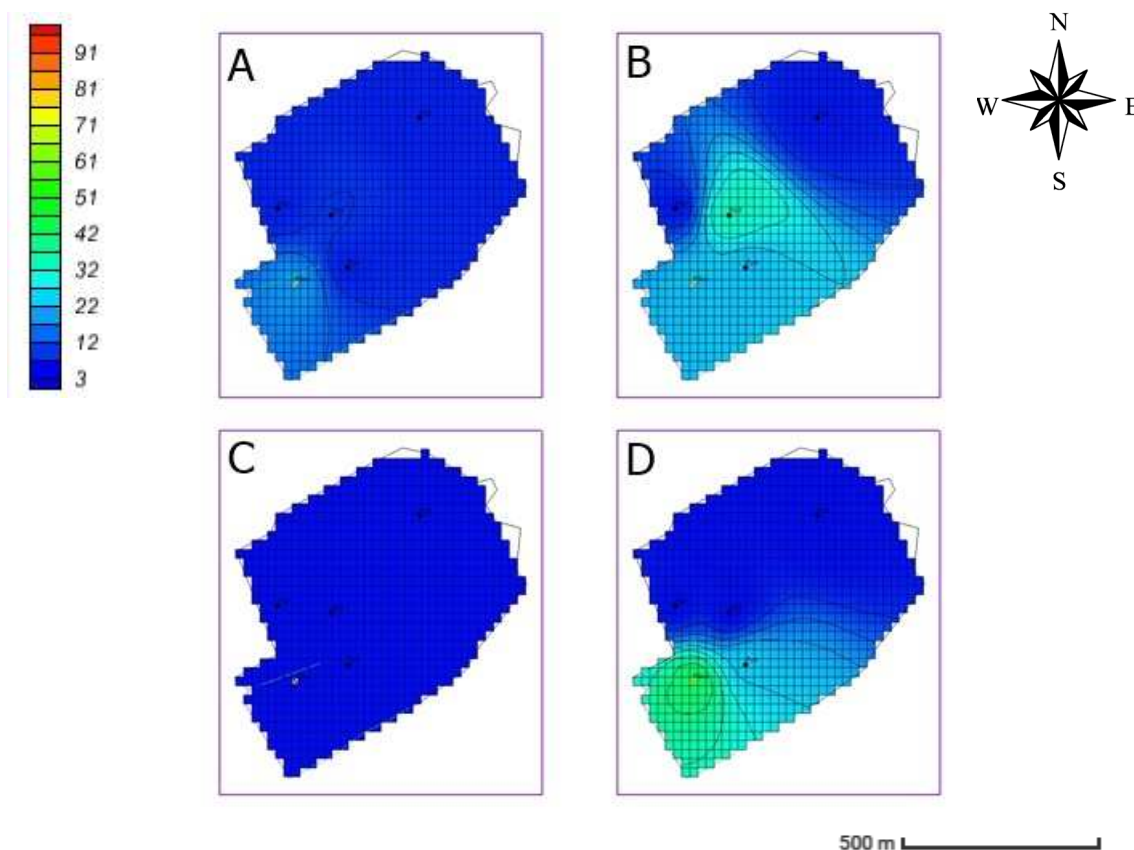


Figura 22: Mapa da distribuição dos níveis de Arsénio; em $\mu\text{g/L}$; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.

Ao analisar a figura 22 nota-se que as amostras recolhidas no ano de 2009 apresentam valores muito semelhantes em todos os piezómetros como também no tubo de fibrocimento, algo que não acontece em mais nenhum elemento analisado.

De salientar que os locais onde existe maior concentração de arsénio variam de ano para ano. As amostras recolhidas em 2007 e 2010 demonstram que o local onde existe maior concentração de arsénio é na saída do tubo de fibrocimento. Quando foram feitas estas amostragens presumia-se que o drenado pelo tubo de fibrocimento

era lixiviado, contudo este pressuposto foi posto em dúvida quando foram realizadas a campanha de amostragem após a construção da autoestrada. O ano de 2010 é o ano em que a concentração de arsénio apresenta valores mais elevados. Relativamente à figura 22B é observável que a zona onde se encontra maior concentração de arsénio é no centro do aterro de cinzas, onde está localizado o Pz3.

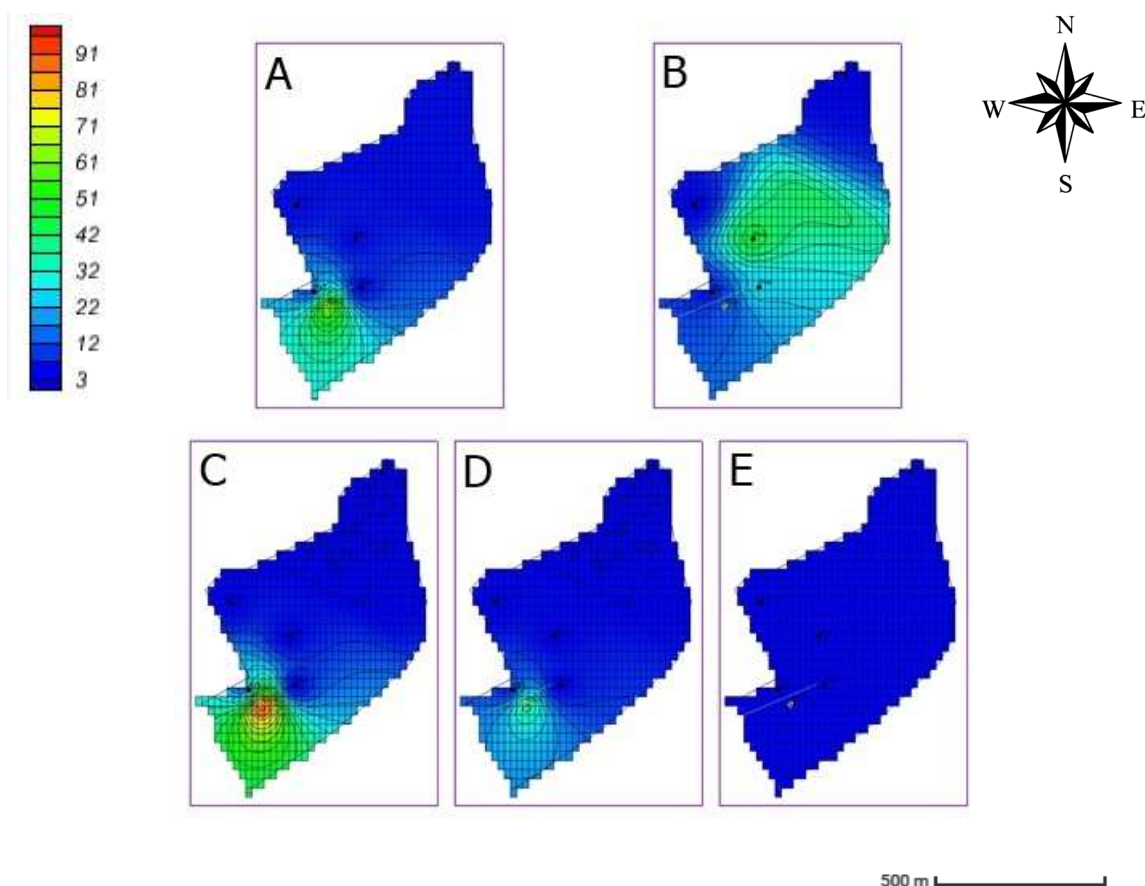


Figura 23: Mapa da distribuição dos níveis de Arsénio; em $\mu\text{g/L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.

Nas análises realizadas após a construção da autoestrada verificou-se que o drenado pelo tubo de fibrocimento não correspondia a lixiviados, mas sim à água subterrânea que escorria sob o fundo do aterro de cinzas. Como tal, a abordagem para este ponto de amostragem sofreu algumas alterações, quer na maneira de como a amostra era recolhida quer na maneira de como eram retiradas as conclusões.

Os resultados obtidos para este parâmetro apresentam algumas características semelhantes aos obtidos no cenário A. É possível verificar que o foco onde existe maior

concentração de arsénio varia de local para local, nas figuras 23A, C e D. O local que apresenta os valores mais elevados é a saída do tubo de fibrocimento.

Nos resultados representados na figura 23B verifica-se que este pólo varia de local, desta feita para o local onde está o Pz3.

Outra característica intrínseca à análise deste elemento está no facto de que em ambas as campanhas existe uma amostragem em que os valores da concentração de arsénio não variam no terreno (Cenário A: Figura 22C, Cenário B: Figura 23E).

Ao analisar os resultados obtido nas duas campanhas de amostragem verifica-se que a quantidade de arsénio para a amostra recolhida em Fevereiro de 2013 apresenta os valores mais elevados (máximo de 96 $\mu\text{g/L}$).

5.4.3 Chumbo

Os resultados obtidos para a distribuição do chumbo no cenário A pode ser observado na figura 24.

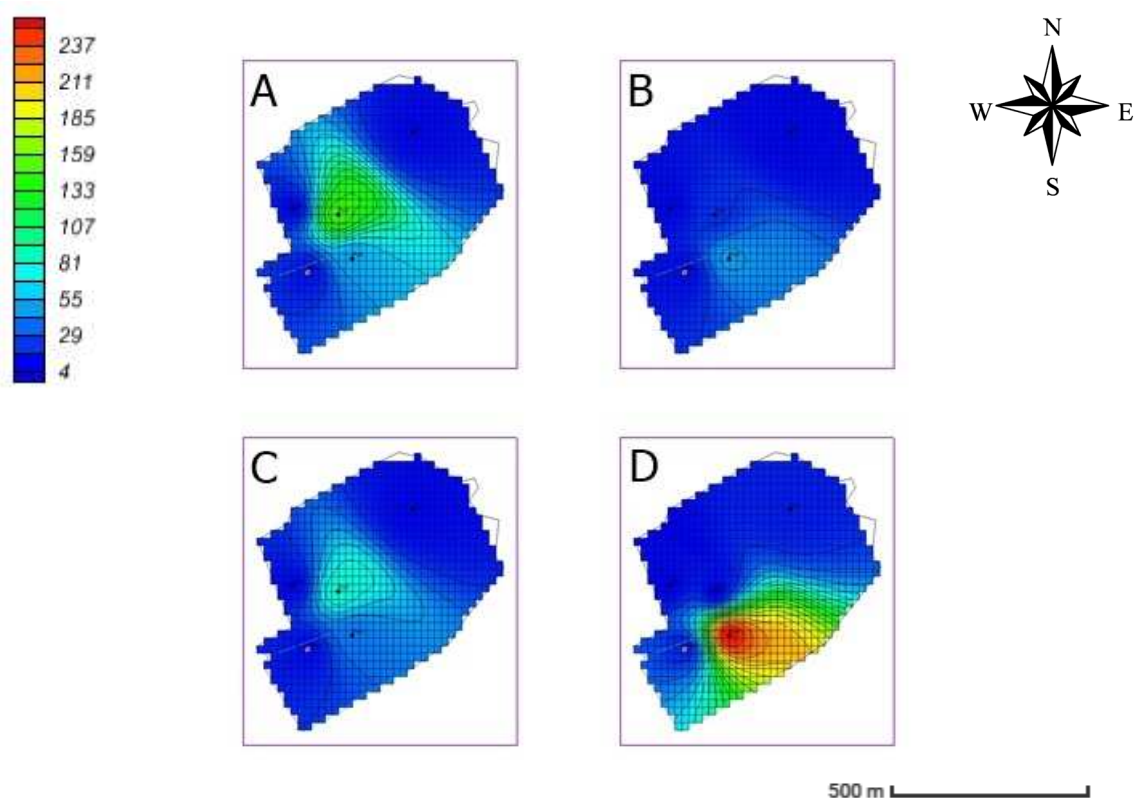


Figura 24: Mapa da distribuição dos níveis de Chumbo; em $\mu\text{g/L}$; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.

Ao analisar de que forma o chumbo se desloca na água subjacente ao aterro de cinzas verificam-se dois focos distintos onde existem grandes concentrações deste elemento. Nas figuras 24A e 24C o local onde existe maior concentração de chumbo é onde está localizado o Pz3, este local apresenta um valor muito elevado quando comparado com os restantes pontos de amostragem.

Relativamente à figura 24B observa-se que a concentração de chumbo é quase uniforme em todo o terreno, com exceção da zona onde está situado o Pz4 onde existe um ligeiro aumento deste parâmetro.

Na última amostragem, realizada em Agosto de 2010, a concentração de chumbo no Pz4 é bastante elevada (250 $\mu\text{g/L}$) quando comparada com os valores recolhidos nos outros pontos de amostragem. Verifica-se também que ela se dissipa na direção SSE. Este valor diverge das leituras feitas anteriormente.

5.4.4 Cobre

Na figura 25 pode observar-se os resultados obtidos para o cobre referente ao cenário B.

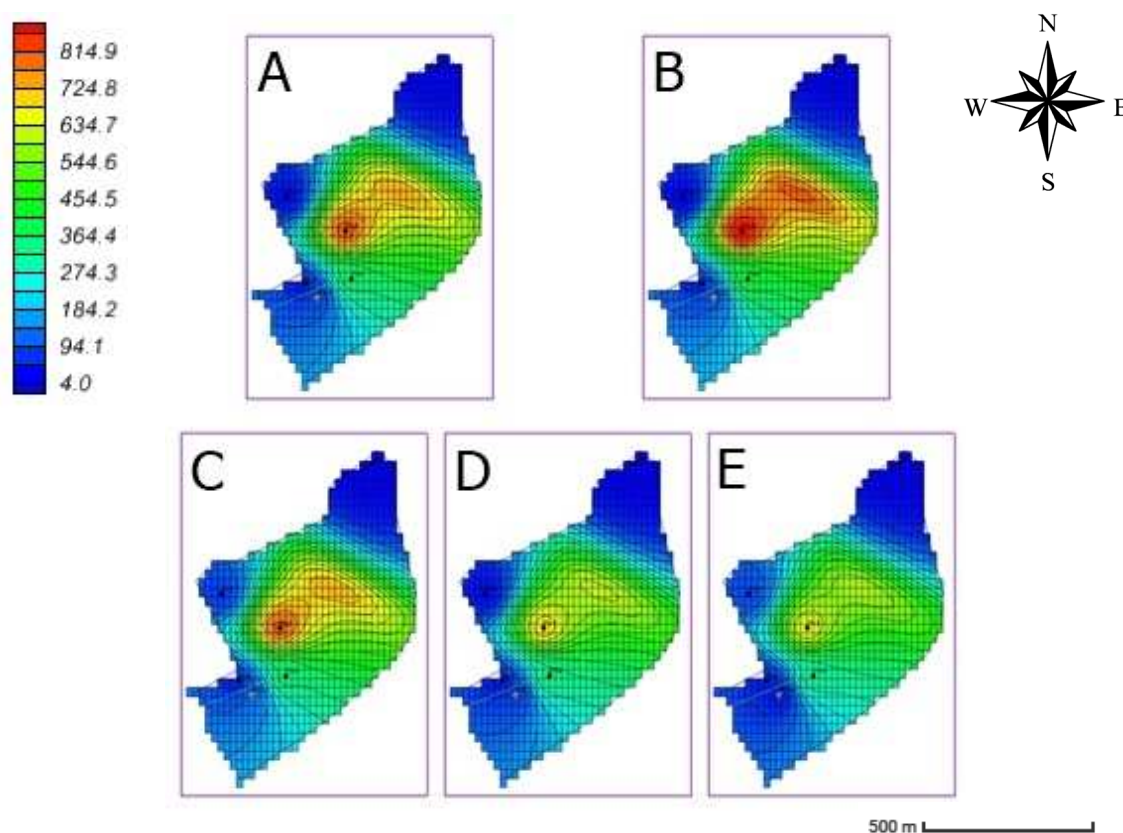


Figura 25: Mapa da distribuição dos níveis de Cobre; em $\mu\text{g/L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.

À semelhança do que acontece com o chumbo também para o cobre se observa que piezómetro três (Pz3) é o que apresenta maiores concentrações. Outra característica inerente a estes resultados prende-se no facto que os Pz1.1, Pz2, Pz5 e o tubo de fibrocimento apresentam valores baixos de cobre.

Os valores da concentração em cobre na zona onde está situado o Pz4 estão de acordo com o esperado, na medida em que se supusermos que o escoamento se dá preferencialmente de NNE para SSW, a concentração de cobre irá dissipar da mesma forma que o modelo conceptual indica.

5.4.5 Ferro

A distribuição espacial do ferro relativa ao cenário B está representada na figura 26.

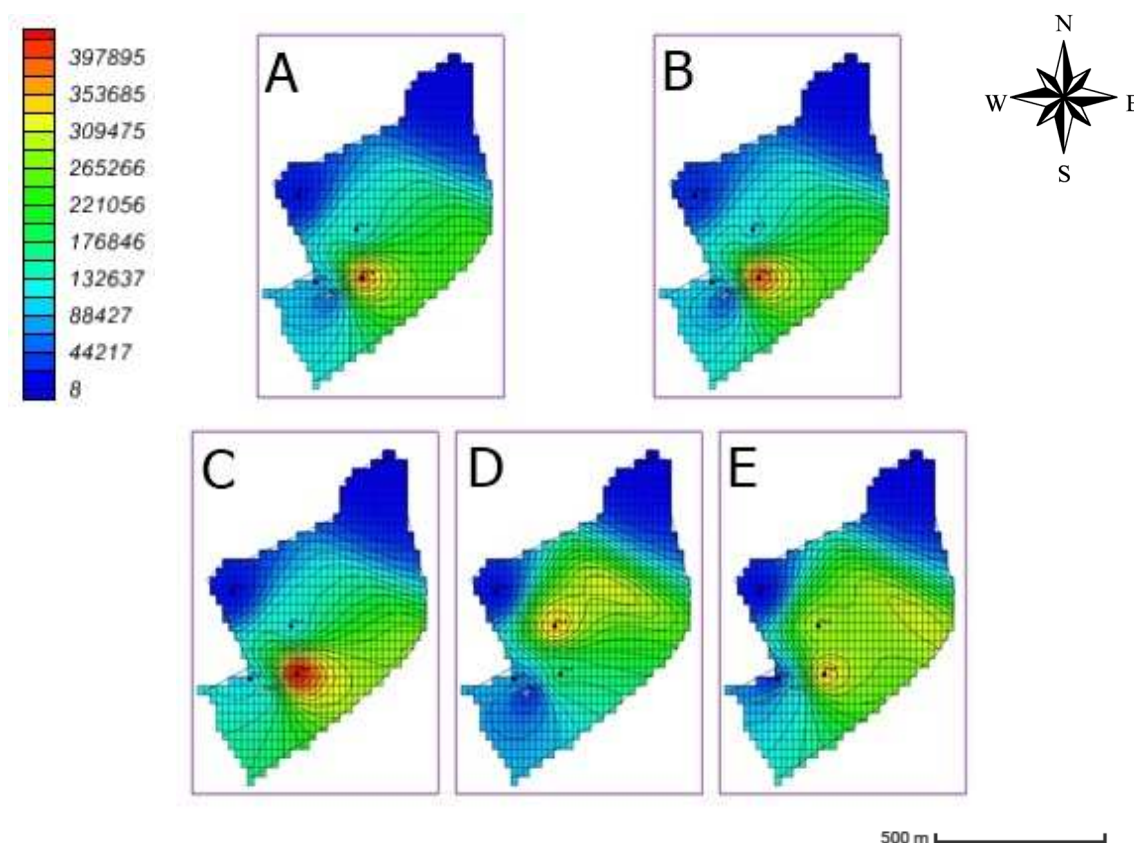


Figura 26: Mapa da distribuição dos níveis de Ferro; em $\mu\text{g/L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.

Através da análise da figura 26 os locais do aterro onde a concentração de ferro é menor nas zonas onde estão situados o Pz1.1 e o Pz2, que estão localizados na

fronteira NNE do aterro. A zona onde se localiza o Pz4 é a que apresenta maior concentração de ferro, com a exceção da figura 26D.

Os dados desta amostragem revelaram alguns valores fora do normal pois na análise destes resultados verifica-se que o local com maior concentração de ferro é a zona do Pz3. Os valores no escoado pelo tubo de fibrocimento em Agosto de 2013 são menores do que os observados nas amostragens anteriores e na amostragem do ano de 2014.

5.4.6 Manganês

Na figura 27 estão representados os mapas de isoconcentrações do manganês referentes ao cenário B.

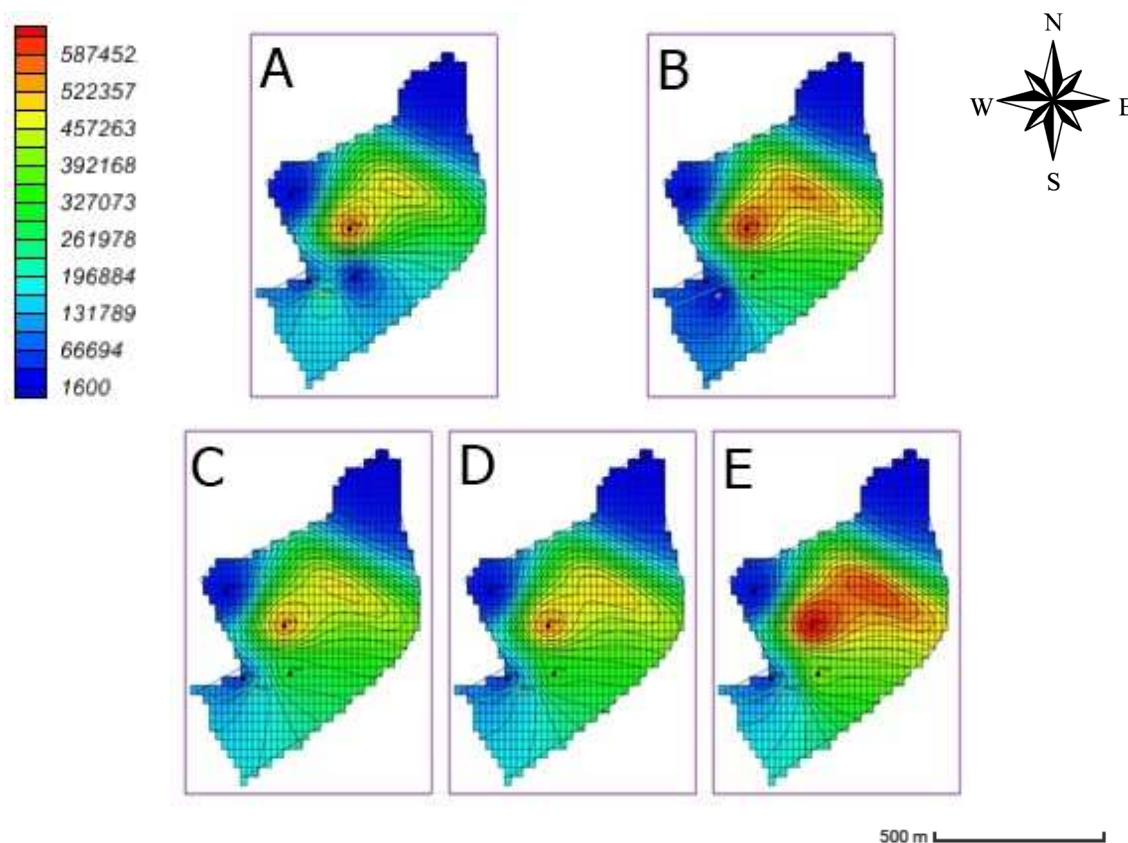


Figura 27: Mapa da distribuição dos níveis de Manganês; em $\mu\text{g/L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.

Relativamente ao manganês é possível observar que apresenta o mesmo padrão de propagação dentro do ambiente hídrico em que se insere. O local onde se observou

maior concentração (na ordem das centenas de milhares, em $\mu\text{g/L}$) deste metal situa-se próximo do centro da área em estudo (localização do Pz3).

De notar que os valores de manganês no tubo de fibrocimento são muito baixos na amostragem de Agosto de 2012 quando comparados com outros ensaios feitos no mesmo local mas em datas diferentes, como é possível observar na figura 28B.

A amostra recolhida em Março de 2014 é a que apresenta maiores quantidades de manganês como é perceptível através da observação da figura 27E.

5.4.7 Níquel

A distribuição espacial observada para os cenários A e B está mapeada nas figuras 28 e 29, respetivamente.

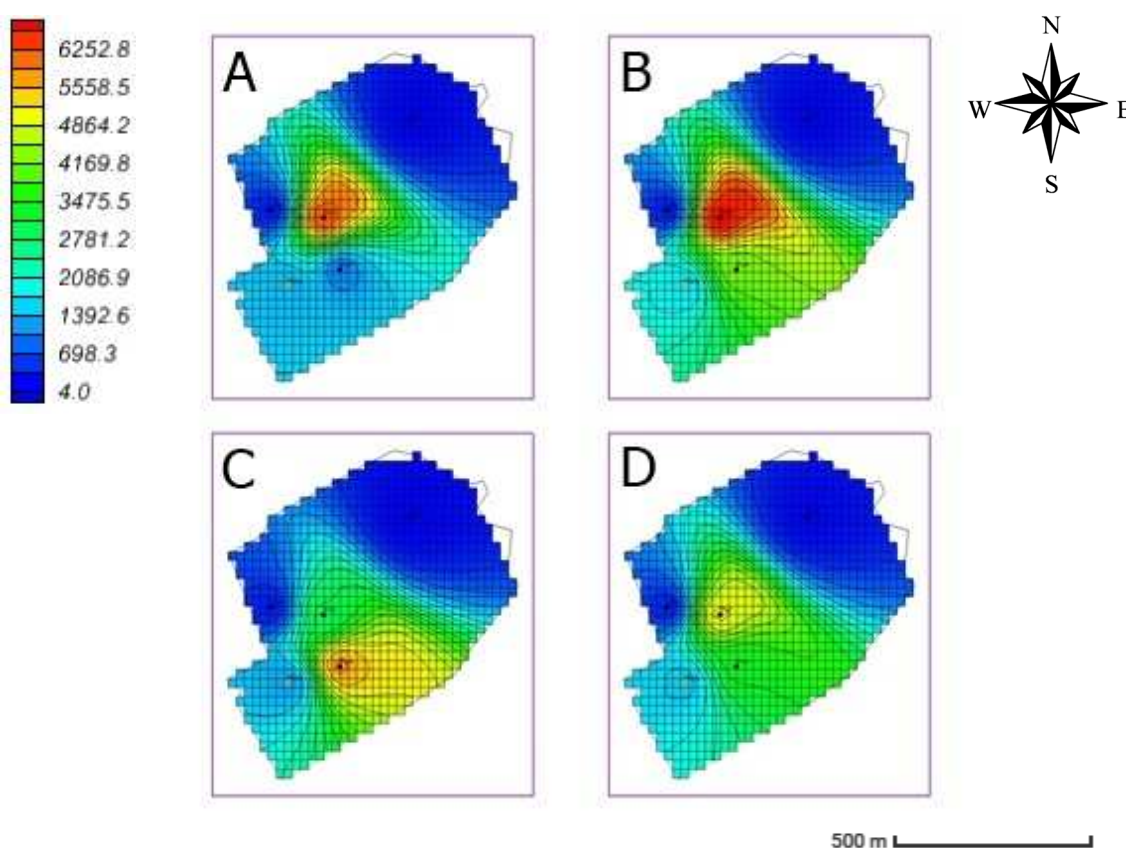


Figura 28: Mapa da distribuição dos níveis de Níquel; em $\mu\text{g/L}$; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.

Pela análise da figura 28 observam-se alguns aspetos que se perpetuam ao longo dos quatro anos em que foram retiradas as amostras. As zonas onde estão situados os Pz1 e Pz2 são as que apresentam os valores mais baixos de níquel.

Na figura 28A, correspondente à recolha feita em Agosto de 2007, verifica-se no Pz4 um nível de níquel superior ao exibido pelo fluido drenado pelo tubo de fibrocimento. Aspeto que apenas se verifica nesta amostragem.

De forma geral verifica-se que o foco com maior concentração de níquel se localiza no centro do aterro (Pz3) nas amostragens A e B, já na amostragem C este foco desloca-se para a zona onde esta situado o Pz4 e por fim volta para o centro do terreno, embora em níveis mais baixos do que os anteriores.

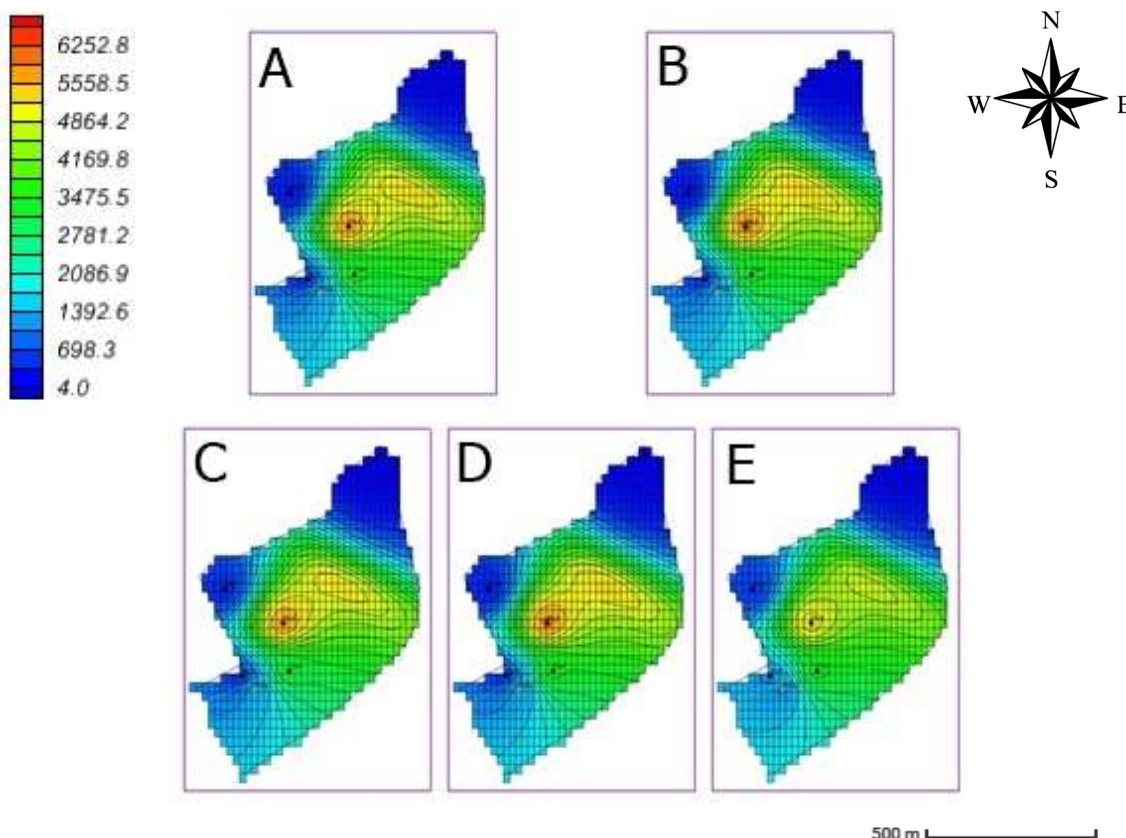


Figura 29: Mapa da distribuição dos níveis do Níquel; em $\mu\text{g/L}$ A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.

Relativamente aos resultados obtidos para cenário B pode concluir-se que o níquel é dos elementos que apresenta maior estabilidade a nível de resultados. Querendo dizer com isto que o local com maior concentração em níquel se situa sempre na mesma posição, zona do Pz3. Os locais menos afetados por este elemento são a norte do aterro (Pz1.1) e a este (Pz2) seguido da zona onde se localizam o Pz5 e o tubo de fibrocimento e por fim o segundo local mais contaminado é onde está localizado o Pz4.

Todas estas características se perpetuam em todas as etapas desta campanha de amostragem.

5.4.8 Zinco

Na figura 30 encontram-se os mapas de isoconcentrações referentes ao zinco no cenário B.

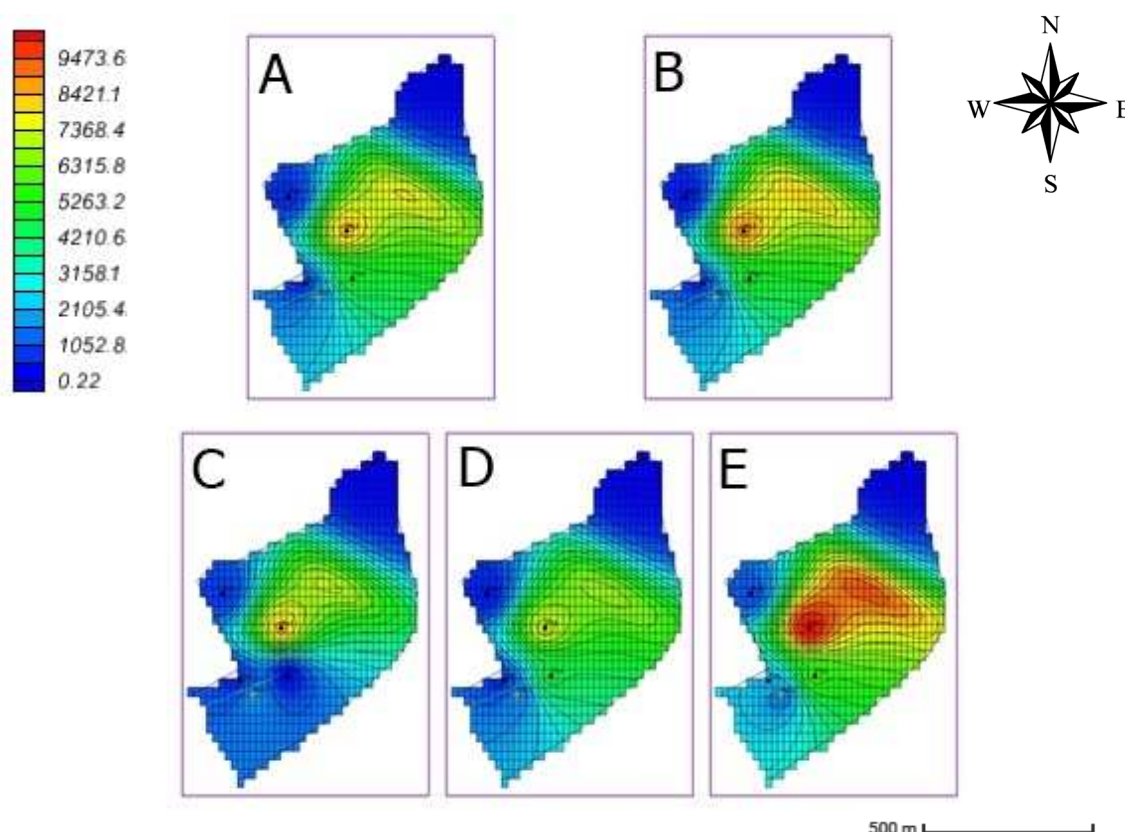


Figura 30: Mapa da distribuição dos níveis de Zinco; em $\mu\text{g/L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) 27/07/2013; E) Março/2014.

A dispersão do zinco apresenta características semelhantes em todas as campanhas de amostragem, isto é, a zona onde está instalado o Pz3 é a que apresenta as concentrações mais altas de zinco em todas as amostragens e o Pz1.1 é o que de todos os pontos de amostragem apresenta os valores mais baixos.

Contudo ao observar a figura 30C verifica-se que o Pz4, que está situado a SSE do Pz3, apresenta valores fora do esperado, enquanto que nas restantes amostragens (A, B, D e E) este valor se encontra na casa dos milhares (4400 a 5400 $\mu\text{g/L}$) o valor da concentração de zinco para a amostragem retirada em Fevereiro de 2013 está na ordem das dezenas (90 $\mu\text{g/L}$).

5.5 Sulfatos

Além dos metais pesados, do pH e da condutividade elétrica também foram analisados os sulfatos presentes na água subterrânea para o cenário B. Os resultados obtidos para este elemento estão presentes na figura 31.

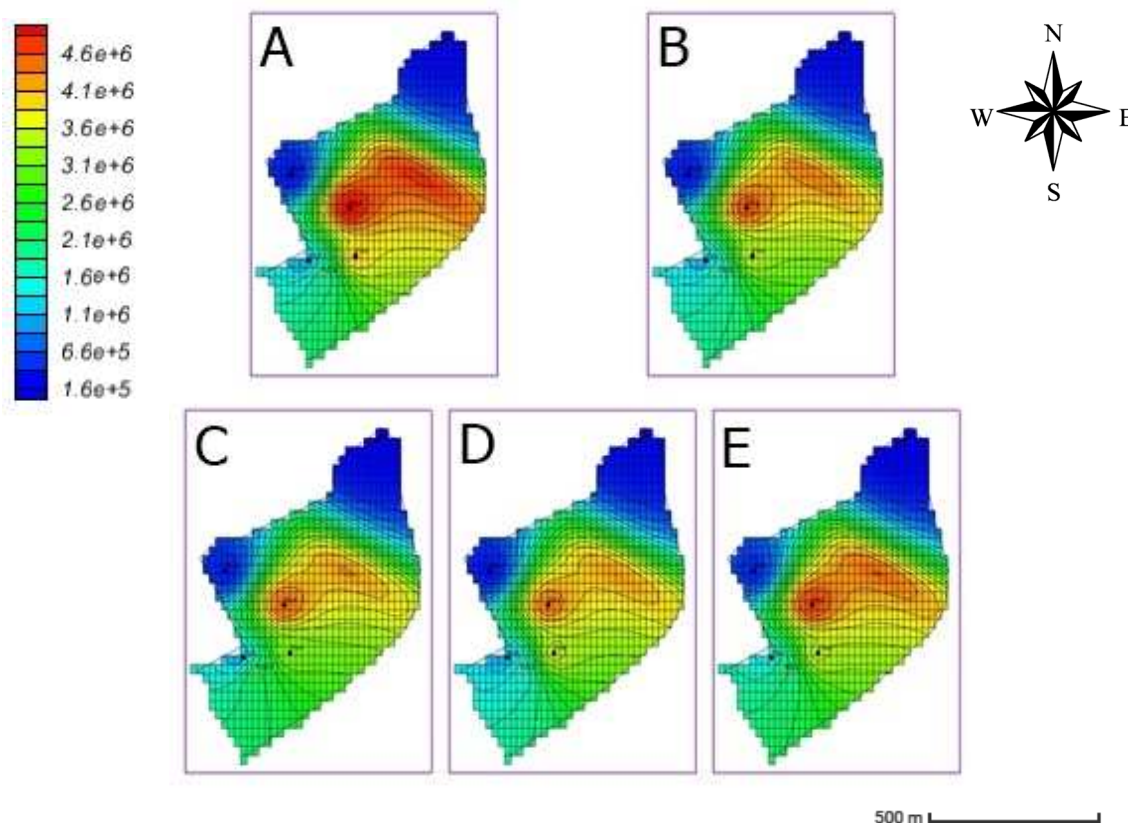


Figura 31: Mapa da distribuição dos níveis de Sulfato; em $\mu\text{g/L}$; A) Janeiro/2012; B) Agosto/2012; C) Fevereiro/2013; D) Agosto/2013; E) Março/2014.

Ao analisar a forma como os sulfatos se deslocam no nosso modelo conceptual verifica-se que o seu padrão de dispersão é constante ao longo dos anos em que foram recolhidas as amostras, de janeiro de 2012 a Março de 2014.

Os locais com menor quantidade de sulfato são as zonas do Pz1 e Pz2, seguido do Pz5, tubo de fibrocimento, Pz4 e finalmente Pz3, que é o que apresenta o maior valor para a concentração de sulfatos.

De notar também que a amostra de Janeiro de 2012 (figura 31) é a que tem maior quantidade deste ião dada a sua cor mais escura no centro do modelo conceptual.

5.6 Análise da Variação do Nível Piezométrico

A variação do nível piezométrico observada nos cenários A e B está representada nas figuras 32 e 33, respetivamente.

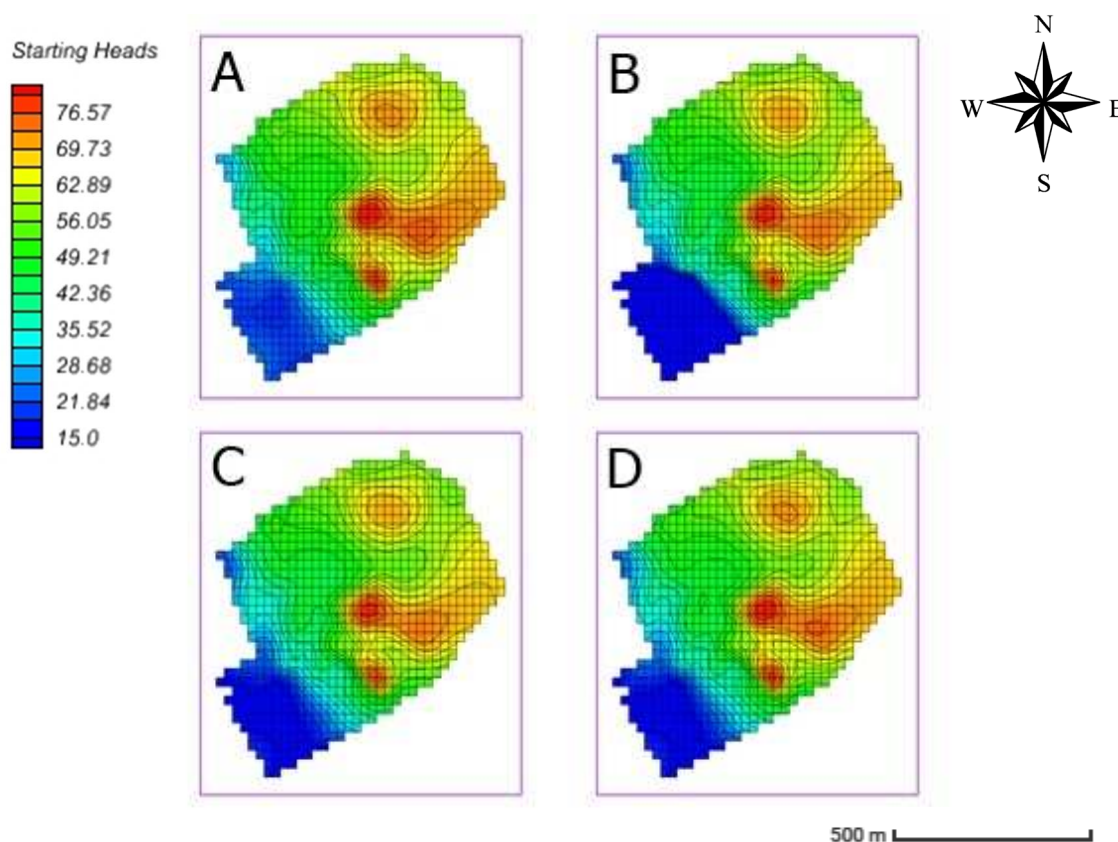


Figura 32: Variação do nível piezométrico; em metros; A) Agosto/2007; B) Agosto/2008; C) Agosto/2009; D) Agosto/2010.

A figura 32 demonstra de que maneira varia o nível piezométrico na zona do aterro antes da construção da auto-estrada. Deste modo verifica-se que os níveis piezométricos não apresentam oscilações muito acentuadas, (com variações a rondar os 1,5 metros) pois as amostras foram recolhidas durante o mês de Agosto em todas as amostragens, altura em que a precipitação é a mais baixa e consequentemente o nível piezométrico será o mais baixo. Esta figura apresenta alguma semelhança com os mapas da figura 18, mostrando assim que os níveis piezométricos variam de acordo

com a topografia do local. Este facto já era de certa forma expectável, dado a morfologia do terreno (encosta a descer para o rio).

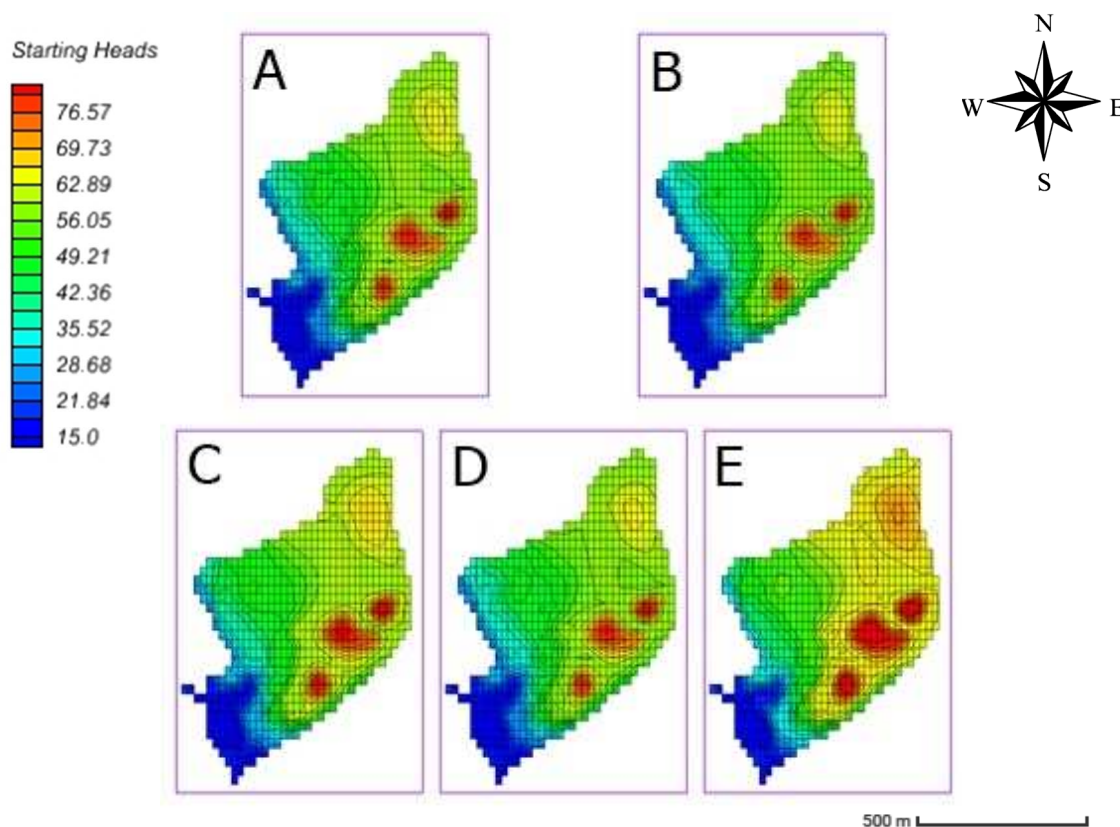


Figura 33: Variação do nível piezométrico; em metros; A)Janeiro/2012; B)Agosto/2012; C)Fevereiro/2013; D)Agosto/2013; E)Março/2014.

Ao observar a figura 33 é possível retirar informações mais relevantes no que respeita à análise dos níveis piezométricos. Como esta análise (cenário B) foi realizada com resultados que foram recolhidos de seis em seis meses, aproximadamente, é possível observar a variação sazonal dos níveis piezométricos.

As figuras 33B e 33D, recolhidas em Agosto apresentam os valores mais baixos (cor mais esverdeada). As análises A e C foram recolhidas no mês de Janeiro e Fevereiro, respetivamente, observando-se valores mais elevados do que os obtidos nas análises B e D. O que coincide com as alturas de maior precipitação. A figura 33E, Março de 2014, apresenta os valores mais altos, mapa mais amarelado. Esta figura (33E) indica que o nível piezométrico neste mês é o mais elevado, quando comparado com os outros resultados.

CAPITULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

As centrais termoelétricas produzem energia elétrica a partir da queima de combustíveis fósseis, neste caso é o carvão, pois é o combustível fóssil mais abundante na natureza e consequentemente o mais barato.

As cinzas de carvão podem apresentar efeitos adversos para o ambiente porque na sua constituição estão presentes metais pesados que se forem lixiviados são mobilizados para as reservas de águas subterrâneas.

No decorrer deste trabalho, foi feita uma análise da dispersão dos níveis de pH, condutividade elétrica, metais pesados e os valores do nível piezométrico na área circundante a um aterro de cinzas localizado na bacia carbonífera do Douro.

As formações geológicas na envolvente do aterro de cinzas são muito heterogêneas, apresentam dobramentos e estão altamente metamorfizadas. A geologia da região provou ser um maciço rochoso resistente, compacto, pouco deformável e estável. Os eixos de escoamento são definidos pelo estado de fracturação e dobramentos do maciço também como pela existência de filões e contactos geológicos.

O GMS-MODFLOW foi a ferramenta escolhida para o estudo do transporte e destino dos contaminantes na área do aterro de cinzas. Este *software* permitiu simular as características do sistema de águas subterrâneas. O GMS-MODFLOW é o programa mais utilizado para simular o fluxo das águas subterrâneas porque:

- Utiliza o método de diferenças finitas, que é relativamente fácil de compreender e aplicar;
- Pode ser aplicado a apenas uma dimensão, duas dimensões e modelos conceptuais de três dimensões;
- Cada pacote do GMS-MODFLOW foi extensivamente testado para simular o comportamento do objeto de estudo num caso real.

Os resultados foram obtidos no decorrer de duas campanhas de amostragem. As medições foram feitas *in situ* com os equipamentos previamente instalados. Quatro dos locais da primeira campanha de amostragem coincidiram com os locais da segunda

campanha da amostragem (Pz2, Pz3, Pz4 e fibro). Na segunda campanha de amostragem utilizaram-se outros novos pontos de amostragem, o Pz1 da primeira amostragem foi recolocado em outro local (Pz1.1) e houve a instalação de um novo piezómetro (Pz5).

Das propriedades da água analisadas verifica-se que para as amostras do cenário A não são as mais fiáveis pois há alterações dos locais onde os valores máximos variam de ano para ano (não apresentam um padrão) sem explicação aparente. Para a condutividade elétrica o local com níveis mais elevados é na zona do Pz4 apenas para a amostra do ano de 2009, nos restantes anos este local está na zona de influência do Pz3. O mesmo acontece com o pH em que o local com valor mais elevado é na zona do Pz3 apenas na amostra recolhida em 2010, nos restantes anos situa-se na zona do Pz4. Por outro lado as amostras do cenário B não apresenta variações dos locais onde os resultados são mais elevados, concluindo que estes resultados são bons indicadores para situação de referência em futuras análises.

Dos metais pesados estudados o alumínio, cobre, manganês e zinco apresentam resultados concordantes, não existindo diferenças de localização dos locais onde as concentrações são máximas e mínimas. Concluindo assim que estes metais são bons indicadores para trabalhos futuros. Facto também comum para o níquel, mas apenas para o cenário B.

Os restantes metais pesados (As, Pb, Fe e Ni no cenário A) não apresentam padrão de distribuição, comprometendo assim a confiabilidade destes resultados da mesma maneira que não poderão ser usados como referência para estudos futuros.

Os sulfatos apresentam resultados consistentes, pois é possível verificar um padrão na distribuição dos seus níveis em todas as etapas da campanha de amostragem.

Em relação aos níveis piezométricos verifica-se que as amostras do cenário A não nos permitem apurar como os seus valores variam porque nesta campanha todas as amostras foram recolhidas no mês de Agosto e assim não é possível fazer uma análise sazonal da variação do nível piezométrico. No cenário B já é verificável a variação sazonal dos níveis piezométricos, no mês de Agosto o nível piezométrico é o mais baixo por ser a época com menos pluviosidade, enquanto os níveis lidos nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março apresentam valores mais elevados, destacando o mês de Março como o mês com o nível piezométrico mais alto.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Ao longo do trabalho realizado detetou-se insuficiência de dados que permitam uma melhor caracterização da área em estudo.

De maneira a obter um modelo mais robusto, de forma a serem feitas previsões fiáveis do comportamento do sistema hídrico recomenda-se:

- Aumentar a área e os locais de recolha de amostras;
- Alterar a periodicidade da recolha das amostras, passar a um regime de recolha trimestral;
- Analisar os solos e as cinzas quanto ao seu teor em matéria orgânica e composição física e química de base;
- Aumentar o conhecimento sobre a geologia local, para entender mais sobre o comportamento dos metais no solo, principalmente nos pontos em que foram detetados maiores valores anómalos de concentração;
- Investigar qual a origem e/ou causa dos pontos anómalos detetados;
- Estabelecer uma análise da correlação entre os elementos estudados.

BIBLIOGRAFIA

Adriano, D. C., Page, A., Eseewi, A. & Straughan, I., 1980. *Utilization and Diposal of Fly Ash and Other Coal Residues in Terrestrial Ecosystems: A Review*¹. s.l.:Evironmental Quality.

Alley, C. J. & Taylor, W. M., 2001. *Groun-Water-Level Monitoring and the Importance of Long-Term Water Level Data*. Virginia: U.S. Department of the Inerior.

Alloway, B., 1990. *Heavy metal in soils*. New York: Jonh Wiley and Son, Inc.

Alloway, B. & Ayres, D. C., 1993. *Chemical Principals of Environmental Pollution, Second Edition*. London, New York: Blackie Academic & Professional.

Anon., s.d. <http://geoportal.lneg.pt/geoportal/mapas/index.html>. [Online].

APA, 2012. *Agência Portuguesa do Ambiente*. [Online] Available at: http://sniamb.apambiente.pt/infos/geoportaldocs/Planos/PGRH3/PGRH3_RB%5CPGRH3_RB_P2.pdf

[Acedido em Março 2016].

Aquaveo, 2011. *GMS 8.0 tutorial - Geostatistics-2D*. s.l.:Aquaveo .

Aquaveo, 2011. *GMS 8.0 tutorials, Geostatistics- 3D*. s.l.:Aquaveo.

Aquaveo, 2011. *GMS 8.3 User Manual*. s.l.:Aquaveo.

Aquaveo, 2011. *MODFLOW conceptual model approach*. s.l.:Aquaveo.

Barbosa, P., 2008. *Centrais Termoeletricas em Protugal*. [Online] Available at: http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Central_da_Tapada_do_Outeiro#Armacenagem

[Acedido em 20 Janeiro 2016].

Bates, R. G., 1973. *Determination of pH: theory and practice..* Wiley: s.n.

Bruckner, M. Z., 2014. *Water and Soil Characterization- ph and Electrical Conduitivity*. [Online]

Available at: http://serc.carleton.edu/microbelife/research_methods/environ_sampling/pH_EC.h

tml

[Acedido em 7 Janeiro 2016].

Decreto-Lei 173/2011, s.d. *Diário da República*, 1.^a série – N.º 116 – 17 de Junho de 2011, s.l.: s.n.

Dinis, M. et al., 2011. *Assessment of direct radiology risk and indirect associated toxic risks originated by Coal-Fired Power Plants*. Porto: EDP Science.

Dunnicliff, J., 1994. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. s.l.:Willey-Interscience.

Elliot, T. C., Chen, K. & Swanekamp, R., 1998. *Standart Handbook of Powerplant Engineering*. s.l.:McGraw-Hill.

Ellis, R., Morgan, P., Weightman, A. & Fry, P., 2003. *Cultivation-dependent an independent approaches for determining bacterial diversity in heavy-metal-contaminated soil..* s.l.:Applied Environmental Microbiology.

Empresa, 2016. *Relatório Técnico com Informação Confidencial*, Porto: s.n.

EPA, 2012. *EPA United States Environemental Protection Agency*. [Online] Available at: <https://owpubauthor.epa.gov/type/rsl/monitoring/vms59.cfm> [Acedido em 14 Janeiro 2016].

Ferret, L. S., 2004. *Zeolitas de cinzas de carvão: sistese e uso. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia*. Porto Alegre, Brasil: Unversidade Federal do Rio Grande do Sul.

Freiberg, C. et al., 1997. *Molecular basis of symbiosis between Rhizobium and legumes*. s.l.:Nature.

GeoPortal, 2014. *Geo Portal*. [Online] Available at: <http://geoportal.lneg.pt/geoportal/mapas/index.html> [Acedido em 16 Março 2016].

GMS-MODFLOW, 2015. *Modelo conceptual antes da autoestrada*, Porto: s.n.

GMS-MODFLOW, 2015. *Modelo conceptual depois da construção da autoestrada*, Porto: s.n.

Gugerli, D., 1996. *Redestrone: Zur Elektrifizierung der Schweiz (1880-1914)*. Zurique: Chronos Verlag.

Harbaugh, 2005. *The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-the Ground-Water Flow Process*. Virginia: U.S Geological Survey.

Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C. & McDonald, M. G., 2000. *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Groundwater Model- User Guide to Modularization Concepts and the Groundwater Flow Process*. Virginia: U.S. Geological Survey.

IEA, 2012. *World Energy Outlook*. Paris: International Energy Agency.

Karamouz, M., Ahmadi, A. & Akhbari, M., 2011. *Groundwater Hydrology Engineering, Planning, and Management*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Lenntech, 2015. *Lenntech*. [Online]
Available at: <http://www.lenntech.com/groundwater/iron.htm>

Lim, K. F., 2006. "Negative pH Does Exist" *Journal of Chemical Education*. Australia: s.n.

Lipor, 2012. *A Lipor*. [Online]
Available at: www.lipor.pt
[Acedido em Março 2012].

Lipor, 2012. *Reciclagem Multimaterial*. [Online]
Available at: <http://www.lipor.pt>
[Acedido em Março 2012].

Lora, E. E. & Nascimento, M. A., 2004. *Geração Termelétrica- Planejamento, Projeto e Operação*. s.l.:Interciência.

Maimone, M. et al., 2003. Coastal aquifer planning elements.. Em: *COASTAL AQUIFER MANAGEMENT monitoring, modeling, and case studies*. London: Lewis Publishers.

Marcuzza, S. F. & Fonseca, J., 2004. *Carvão Combustível de Ontem. Núcleo amigo da terra Brasil*. [Online]
Available at: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/13121000/cartilha-quotcarvao-o-combustivel-de-ontemquot-amigos-da-terra-brasil>
[Acedido em 20 Janeiro 2016].

McBride, M. B., 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press.

- Miller, R. L., Bradfordley, W. L. & Peters, N. E., 1988. *Specific Conductance: Theoretical Considerations and Application to Analytical Quality Control*. Dallas: U.S. Geological Survey Water-Supply.
- Ministério do Ambiente, 2002. *Decreto-Lei 152/2002*. s.l.:Diário da República.
- Ministério do Ambiente, 2008. *Decreto-Lei nº 208/08*. s.l.:Diário da República.
- Ministério do Ambiente, 2009. *Decreto-Lei 183/2009*. s.l.:Diário da República.
- Naturlink, 2009. *TERRA À TERRA - Projecto de Compostagem Caseira*. [Online] Available at: <http://naturlink.sapo.pt> [Acedido em Março 2012].
- Nixon, S. C., Lack, T. J. & Hunt, D. T. E., 2010. *Recursos hídricos na europa: uma utilização sustentável?*. Copenhaga: Agência europeia do ambiente.
- Oliveira, J. F. d. C. & Carravilla, M. A. d. S. L. d., 2001. *Optimização Combinatória: modelos e algoritmos*, s.l.: s.n.
- Oram, B., 2014. *Water Research Center*. [Online] Available at: <http://www.water-research.net/index.php/sulfates> [Acedido em 15 Março 2016].
- Rebelo, F., 1975. *Serras de Valongo. Estudo de geomorfologia.*, Coimbra: Universidade de Coimbra.
- Santos, R. M. G. d., 2008. *Caracterização Hidrogeológica e Hidrogeoquímica da Área Mineira de Germunde, Pejão*, Lisboa: Instituto Superior Tecnico.
- Siebert, S. et al., 2010. *Groundwater use for irrigation - a global inventory*, s.l.: Hydrology and Earth System Sciences.
- Stultz, S. C. & Kitto, J. B., 2005. *Steam: Its Generation and Use 41st Edition*. Dallas: The Babcock & Wilcox Company.
- Swanson, H. A. & Baldwin, H. L., 1965. *A Primer on Water Quality*. s.l.:U.S. Geological Survey.
- Tóth, 1970. *A conceptual model of the groundwater regime and hydrogeologic environment..* Alberta: Journal of Hydrology.
- Tóth, J., 1971. *Groundwater Discharge: A Common Generator of Diverse Geologic and Morphologic Phenomena*, s.l.: International Association of Scientific Hydrology.

U.S. Department of the Interior, 1997. *Modeling Ground-Water Flow with MODFLOW and Related Programs*, s.l.: USGS.

USGS, 2014. *The USGS Water Science School*. [Online] Available at: <http://water.usgs.gov/edu/wupt-coalplant-diagram.html> [Acedido em 19 Janeiro 2016].

Wang, S. & Hongwei, W., 2006. *Environmental-benign utilisation of fly ash as low - cost*. s.l.:Elsevier.

WHO, 2004. *World Health Organization*. [Online] Available at: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/sulfate.pdf [Acedido em Março 2016].

Witherspoon, P. A. & Freeze, R. A., 1968. *Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow: 3. Quantitative Interpretations*, s.l.: AGU.publications.

Zhou, Y. & Li, W., 2011. *A review of regional groundwater flow modeling*, s.l.: Geoscience Frontiers.

ANEXO I

Guião para a utilização do GMS-MODFLOW para criar um modelo conceptual das águas subterrâneas do aterro de cinzas da ex- CTO.

De forma a dar início à modelação do modelo hidrogeológico do aterro de cinzas da CTTO com recurso ao modelador GMS-MODFLOW optou-se por adotar a seguinte metodologia.

- 1- Abrir o programa GMS
- 2- Definir unidades. Neste caso alterou-se a concentração para ppm, tempo para dias e comprimento para metros. De acordo com as unidades dos dados recolhidos.
- 3- Importar o ficheiro que contém a carta-militar da CTTO, para tal procedeu-se da seguinte forma.

File -> Open -> carta-militar (Aquaveo, 2011)

- 4- Criação dos *2D scatter points*. No Project Explorer clicar no espaço vazio com o botão direito do rato e seleccionar *new| 2D scatter point set*. Um conjunto de *2D scatter points* é definido pelas coordenadas xy. Estes dados podem ser escalares ou vetoriais, cada valor corresponde a cada *scatter point*. Estes conjuntos de dados podem representar elevações, temperaturas, concentrações de um químico, etc,. Estes pontos depois são interpolados com TINs, Mesh ou Grid. Neste caso será com uma Grid. (Aquaveo, 2011)

Seleccionar *creator points* e criar um conjunto de pontos na carta militar que represente as elevações mais relevantes de modo a ser interpolado mais à frente no projeto.

- 5- Criação dos *3D scatter points* são similares aos *2D scatter points*, com a excepção de que cada ponto tem uma coordenada z em adição às coordenadas xy. Tal como os *2D scatter points* um ou mais conjuntos de valores podem ser associados a cada *scatter point*. Representando valores como concentração de contaminantes, porosidade, condutividade hidráulica, etc. Neste caso de estudo este conjunto de pontos representará concentração de contaminantes e o pH dos lixiviados do aterro de cinzas.

No *Project Explorer* clica-se com o botão direito do rato no espaço vazio e selecciona-se *New| 3D scatter points*, selecciona-se a ferramenta *create point* cria-se os pontos na carta militar. (Aquaveo, 2011) Estes pontos representarão os valores das concentrações de contaminante e o pH nos pontos de amostragem. Para os quatro piezómetros admitiu-se que o valor da concentração do contaminante se situa no ponto médio do piezómetro, isto é, a coordenada z será a cota do piezómetro menos a metade da sua profundidade.

$$\text{Ponto médio} = \text{cota} - (\text{profundidade}/2)$$

Para o fibrocimento a coordenada z equivale à cota nesse ponto. Estes valores serão mais tarde interpolados com a Grid.

- 6- Definir fronteira, no *Project Explorer* criar *new conceptual model*, dar nome a *coverage*, neste caso “Boundary”, definir a elevação padrão e o número de *layers*. Selecionar a ferramenta *create arc* e criar a fronteira da área a estudar. Esta fronteira será um polígono que circundará o aterro de cinzas da CTTO. A fronteira fica definida ao fechar o *arc*, isto é, o primeiro ponto é intersetado com o último ponto da *arc*, clicamos no ponto onde começamos. (Aquaveo, 2011)
- 7 - Definir as *sources* and *sinks*. Duplicar a *coverage* “Boundary”, alterar o nome para “sources & sinks”. Selecionar *coverage setup* e na lista de Sources/Sinks/Bcs ativar *layer range*, *specified head* e *drain*.
 - Layer range - representa a sequência do número de camadas na rede MODFLOW que são coincidentes com o modelo sólido. (Aquaveo, 2011)
 - Specified head - significa o nível freático num dado ponto. O nível freático é atribuído aos *nods* em que temos a informação do nível freático. Se dois valores são atribuídos a dois *nods* diferentes o GMS assume que o nível freático varia linearmente ao longo da *arc*. (Aquaveo, 2011)
 - Drain - este pacote é utilizado para simular o efeito de um escoamento no aquífero. Servem para remover água do aquífero desde que o nível freático seja superior ao do escoamento. (Aquaveo, 2011)Comprovar que a opção “Use to define model boundary” está ligada e clicar OK. (Aquaveo, 2011)
- 8 - Definir as *specified head arcs*. Dividimos a *arc* em duas, uma parte que está inativa e a outra que tem o valor definido da *specified head*, que neste caso é ao trecho da nossa área de estudo que engloba o trecho que define a fronteira entre o aterro de cinzas e o rio douro. Para tal selecionamos os vértices em questão com a ferramenta *select vertice* e com clique do botão direito do rato seleciona-se o comando *Vertex->Node*. Agora com as duas *arcs* definidas seleciona-se a ferramenta *Select Arcs* e seleciona-se a *arc* que percorre o rio Douro, abre-se a tabela de atributos e na coluna *Type* escolheu-se *spec. head* e clica-se o botão OK. (Aquaveo, 2011)
- 8.1 - De seguida define-se a “head” nos *nods* nas extremidades da *arc*. Seleciona-se a ferramenta *Select Points/Nodes*, duplo clique nos nós em que queremos inserir os valores do nível freático e clicar OK. (Aquaveo, 2011)
- 9 - Definir as *Drains*. Com a ferramenta *Create Arc* desenha-se a *Arc* nos cursos de água visíveis na carta-militar. Selecionam-se estas últimas duas *arcs* com a ferramenta *select arc* e abre-se a tabela de atributos e muda-se o seu tipo para *Drain* (neste caso não há informação disponível para os valores do caudal escorrido) (Aquaveo, 2011)
- 9.1 - Definir as elevações das *drains* e da fronteira da zona em estudo. Com a ferramenta *Select Points/Nodes* abre-se a tabela de atributos dos *nods* em que queremos alterar as elevações. Para tal alteramos a propriedade “Bot.elev.” para o valor que pretendemos.
- 10- Construir o polígono. É necessária a construção de um polígono na região a ser

modelada para não ocorrer sobreposição de polígonos. Isto define a região ativa da rede. A melhor maneira para construir o polígono é criar todas as *arcs* usadas na coverage e selecionar o comando *Build Polygons*. Este comando procura através das *arcs* criadas um polígono para cada loop definido pelas *arcs*.

Agora com todas as *arcs* criadas para a coverage “sources&sinks” podemos construir o nosso polígono. Selecionar o comando Feature Objects → Build Polygons. (Aquaveo, 2011)

- 11- Definir os pontos de amostragem. O passo final na coverage sources&sinks é definir os piezómetros e o fibrocimento. Para tal com a ferramenta *Create Point* cria-se os pontos de amostragem. Seleciona-se a ferramenta *Create Point* e move-se o cursores para os locais onde os pontos de amostragem estão situados e cria-se os pontos, definindo as respetivas elevações que correspondem às elevações do terreno. Abre-se a tabela de atributos destes pontos, muda-se o tipo para *spec,head* e insere-se os valores dos níveis freáticos nesses pontos nas diferentes datas em que foram retiradas as amostras. De seguida refina-se estes parâmetros com a profundidade dos piezómetros. No fibrocimento não é necessário refinar.
- 12- Zonas de recarga. Duplica-se a coverage “Boundary” e muda-se o nome para “Recharge” e na lista de *Areal Properties* ativamos a propriedade Recharge Rate e clica-se OK. Neste caso a zona de recarga será a mesma que o terreno pois a recarga será igual ao volume da precipitação nesta área. Agora constrói-se o polígono com o comando *Feature Objects|Build Polygons*. Para atribuir os valores de recarga seleciona-se a ferramenta Select Polygons, faz-se duplo clique no polígono e altera-se o valor de *Recharge rate* para o pretendido.
- 13- Definir a condutividade hidráulica. Mais uma vez duplica-se a Boundary e muda-se o nome para Layer1 e ativa-se as propriedades *Horizontal K* e *Vertical anis*. Construir o polígono como descrito anteriormente. Com a ferramenta *Select Polygons* dá-se duplo clique na coverage e atribui-se os valores da *Horizontal K* e *Vertical anis*.
- 14- Localizar a *Grid Frame*. Seleciona-se a coverage sources&sinks para esta ser a coverage ativa.

Clica-se no botão direito do rato no *Project Explorer* e seleciona-se o comando *New|Grid Frame*, clica-se duas vezes no ícone da *Grid Frame* localizado no *Project Explorer* para abrir as propriedades e altera-se o Origin z e Dimension z para as dimensões que queremos, assim o MODFLOW arbitra um conjunto de valores iniciais para as elevações das Layers, neste caso será apenas uma. Clica-se OK para sair do diálogo da *Grid Frame*.
- 14.1- Criar a Grid. Selecionar o comando Feature Objects| Map → 3D Grid. Alteram-se os valores de X e Y de forma a se enquadrar na *Grid Frame*. Muda-se o número de células nas linhas e nas colunas (neste caso 40x40) o número de células na dimensão Z é 1.
- 15 - Iniciar MODFLOW. Clica-se com o botão direito do rato em Grid Frame no Project Explorer e seleciona-se o comando New MODFLOW e clica-se OK

Agora que a Grid está construída e as zonas ativas/desativas estão delineadas converte-se o modelo conceptual para um modelo numérico da Grid.

15.1 - Definir as zonas ativas/inativas. Seleciona-se a pasta *Map Data* no *Project Explorer* e escolhemos o comando *Feature Objects| Active Cells in Coverage*.

16- Interpolação das elevações da layer. O método utilizado para interpolar as elevações da camada foi utilizando um conjunto 2D scatter points previamente estabelecido. Usou-se dois conjuntos de pontos, um para as elevações superiores e outro para as elevações inferiores. Estes pontos foram obtidos através da leitura da carta militar da zona da Central da Tapada do Outeiro. Estipulou-se que a elevação inferior seria igual à da superfície do rio Douro.

No *Project Explorer* expande-se a pasta *2D Scatter Data*, ativar conjunto de pontos Elev. Clica-se com o botão direito do rato e selecciona-se o comando *Interpol To| MODFLOW Layers*.

Na caixa de dialogo que aparece selecciona-se o *top* para *Top Elevations Layer 1* e *Bottom1* para *Bottom Elevations Layer 1* e clica-se no botão *Map*. Clicar em OK para sair da caixa de dialogo.

17- Ajustar as elevações. Em primeiro lugar selecciona-se o comando *MODFLOW| Check Simulation*, de seguida clica-se no botão *Run Check* e seleccionamos o botão *Fix Layer Errors* no lado direito da caixa de dialogo. De reparar que aparecerá o numero de erros nas respectivas camadas, neste caso será apenas uma camada. Neste momento escolhe-se o tipo de reparação que pretendemos. (conceptual model) Ao interpolar as camadas com o propósito de definir as elevações das camadas do MODFLOW é usual ocorrer casos em os valores se sobrepõem. O botão *Fix Selected Layer* corrige esses erros. Existem quatro tipos de reparações diferentes. Para o nosso caso utilizou-se a opção *Preserve Top*, neste caso onde existe sobreposição o valor da elevação superior mantém-se e a elevação inferior é ajustada. (Aquaveo, 2011)

18- Para ter uma ideia melhor do relevo do terreno criou-se uma TIN. Para isso clicou-se com botão direito do rato na pasta “Elev” e acionou-se o comando *Convert To| TIN*. As TINS são formadas pela conexão dos conjuntos de pontos anteriormente definidos com coordenadas X,Y e Z e com as bordas da converge ativa formando uma rede de triângulos. São utilizados para representar a superfície de uma unidade geológica. (Aquaveo, 2011)

19- Interpolar as concentrações. Ao criar os *3D scatter points* optou-se por criar vários conjuntos de pontos que estão divididos conforme a data da amostragem em que se obtiveram esses dados, dentro desta pasta criou-se um ficheiro designado “Concentrações” dentro desse ficheiro criou-se quatro conjuntos de dados que representam os valores das concentrações em diferentes períodos de amostragem. Em cada conjunto de dados transcreveu-se os valores obtidos nas análises nos pontos de amostragem, estes conjuntos podem variar conforme os dados disponíveis.

Com isto interpola-se os dados obtidos, para tal selecciona-se o ficheiro *Concentrações*

e a data que queremos interpolar, clicar com botão direito do rato no ficheiro “Concentrações” e seleccionar o comando *Interpol to| 3DGrid*.

Existem vários tipos de interpolações, neste projeto utilizou-se o método inverse distance weighted (idw) na opção Constant (shepard method).

ANEXO II

Excerto da carta militar 134 1:25000, correspondente á zona do aterro de cinzas.

